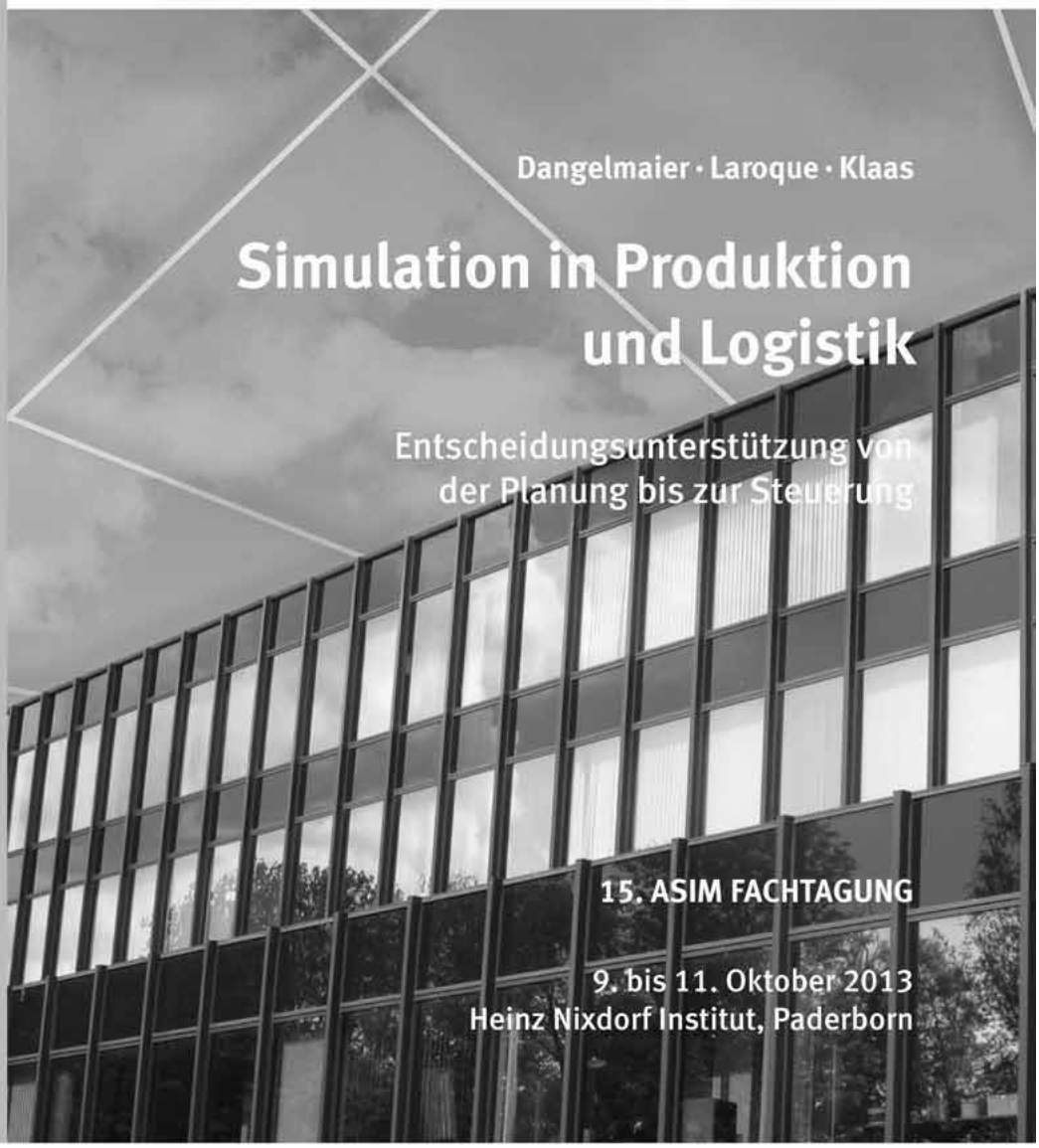
Band 316

HNI-Verlagsschriftenreihe
Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier (Hrsg.)
Wirtschaftsinformatik, insb. CIM

Dangelmaier · Laroque · Klaas

Simulation in Produktion und Logistik

Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung



15. ASIM FACHTAGUNG

9. bis 11. Oktober 2013
Heinz Nixdorf Institut, Paderborn

HEINZ NIXDORF INSTITUT
Universität Paderborn

Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque &
Alexander Klaas (Hrsg.)

Simulation in Produktion und Logistik 2013

Paderborn, 09.-11. Oktober 2013

Die ASIM-Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ ist die regelmäßige Tagung der Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik" der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM). Die ASIM ist zugleich der Fachausschuss 4.5 der Gesellschaft für Informatik (GI).

Dieses Buch ist registriert als ASIM-Mitteilung Nummer 147.

Programmkomitee

LEITER: Wilhelm Dangelmaier, Universität Paderborn (Paderborn, Germany)

Simon Altemeier, Taktiq GmbH & Co KG (Paderborn)
Hans-Peter Barbey, FH Bielefeld
Carsten Böhle, WWU Münster
Mathias Bös, SDZ (Dortmund)
Uwe Bracht, TU Clausthal-Zellerfeld
Thorsten Claus, IHI Zittau
Uwe Clausen, TU Dortmund
Wilhelm Dangelmaier, Heinz Nixdorf Institut (Paderborn)
Volkhard Franz, Universität Kassel
Matthias Heinicke, Siemens Industry Software GmbH & Co. KG (Stuttgart)
Frank Herrmann, Hochschule Regensburg für angewandte Wissenschaften
Jan Himmelspach, Universität Rostock
Daniel Huber, Arizona State University, Tempe, USA
Angel Juan, Open University of Catalonia (Barcelona)
Mark Junge, Limón GmbH (Kassel)
Botond Kádár, SZTAKI(Budapest, Ungarn)
Jan Kaffka, TU Dortmund
Alexander Klaas, Heinz Nixdorf Institut (Paderborn)
Christoph Laroque, Heinz Nixdorf Institut (Paderborn)
Peter Lendermann, D-SIMLAB Technologies (Singapur)
Lothar März, LOM Innovation GmbH & Co. KG (Lindau)
Gottfried Mayer, BMW Group (München)
Masaru Nakano, Keio University (Yokohama)
Stefan Nickel, Karlsruher Institut für Technologie
András Pfeiffer, SZTAKI (Budapest, Ungarn)
Holger Pitsch, INCONTROL Simulation Solutions (Wiesbaden)
Carsten Pöge, Volkswagen AG (Wolfsburg)
Markus Rabe, TU Dortmund
Oliver Rose, Universität der Bundeswehr (München)
Monika Schneider, Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG (Holzgerlingen)
Anders Skoogh, Chalmers University of Technology (Göteborg, Schweden)
Sven Spieckermann, SimPlan AG (Maintal)
Dirk Steinhauer, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH und Co KG (Flensburg)
Patricia Stock, Karlsruher Institut für Technologie
Simon Taylor, Brunel University (Uxbridge, UK)
Juri Tolujew, Fraunhofer IFF (Magdeburg)
Markus Vorderwinkler, PROFACTOR GmbH (Steyr-Gleink, Österreich)
Gerald Weigert, TU Dresden
Sigrid Wenzel, Universität Kassel
Gert Zülch, Karlsruher Institut für Technologie

HEINZ NIXDORF INSTITUT
Universität Paderborn

Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)

Simulation in Produktion und Logistik 2013

Paderborn, 09.-11. Oktober 2013

HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn

Kontaktadresse:
Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11, 33102 Paderborn
E-Mail: whd@hni.upb.de

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen National-bibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar

Simulation in Produktion und Logistik 2013

Hrsg. Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas

Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, 2013.

zgl. Tagungsband 15. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Paderborn, 09.-11. Oktober 2013

zgl. ASIM-Mitteilung Nr. 147

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2013
Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Hersteller: W.V. Westfalia Druck GmbH
Druck . Buch . Verlag
Paderborn

Printed in Germany

ISBN 978-3-942647-35-9

Vorwort

Die Gestaltung, Inbetriebnahme und kontinuierliche Reorganisation seiner Fertigungssysteme ist für jedes Unternehmen im globalen Wettbewerb eine entscheidende Planungsaufgabe, deren Bewältigung durch eine zunehmende Vernetzung der Güterströme, verkürzte Produktentwicklungs- und Produktlebenszyklen und den Anstieg der Variantenvielfalt der zu erstellenden Produkte in immer kürzeren Abständen erfolgen muss. Gleichzeitig verstärkt die Struktur und Dynamik der Fertigungssysteme selbst die Komplexität der Planungsaufgabe durch die zunehmenden Interdependenzen der einzelnen Prozesselemente und resultierende, komplexe Steuerungsregeln. Ein weiterer Komplexitätstreiber sind die ungeplanten Ereignisse, die in der Umsetzung die eigentliche Durchführung eines optimierten Plans behindern und deren Auswirkungen im Rahmen der Planung, Inbetriebnahme und des Betriebs eines Fertigungssystems abzuschätzen und bestmöglich abzumildern sind.

Die 15. ASIM Fachtagung am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn beleuchtet die Rolle der Simulation als Instrument zur Entscheidungsunterstützung in diesem Planungsprozess über die Inbetriebnahme bis zum Betrieb komplexer Produktions- und Logistiksysteme. Ist die Simulation als Planungswerkzeug bereits seit Jahren etabliert und bei vielen Unternehmen fest verankert, so kann sie auch in der Inbetriebnahme und im Betrieb dieser komplexen Systeme wichtige Hinweise und Informationen geben, um diese kontinuierlich zu verbessern. Hier bieten sich zahlreiche neue Anwendungsmöglichkeiten und Forschungsthemen, von Fragen der durchgehenden Modellierung bis zur systemtechnischen Integration als Entscheidungsunterstützungswerkzeug.

Der vorliegende Tagungsband gibt mit über 70 Beiträgen von 160 Autoren einen vertiefenden Einblick in die aktuellen methodischen Entwicklungen und Trends und zeigt Beispiele guter Praxis auf. In den Keynotes aus der industriellen Anwendung beschreiben zwei Vertreter verschiedener Branchen die Einsatzmöglichkeiten und Zukunftsperspektiven der Simulation im praktischen Umfeld. Die wissenschaftliche Keynote schaut über die Simulation hinaus hin zu einem ganzheitlichen Digital Engineering. Verschiedene Anwendungsgebiete wie z.B. Halbleiterfertigung, Hafenlogistik, Intralogistik oder Unikatprozesse werden ebenso beleuchtet wie spezielle Aspekte der Validierung & Verifikation, der Abbildung von Nachhaltigkeitsaspekten, der personalorientierten Simulation oder der Kombination der Simulation mit Verfahren der Optimierung. Wir wünschen dem Leser beim Stöbern, Nachschlagen und vertieften Lesen nach den Fachvorträgen der Tagung viel Vergnügen.

Paderborn, im Oktober 2013

Prof. Dr.-Ing. habil. W. Dangelmaier
Dr. Christoph Laroque
Alexander Klaas

Foreword

The design, ramp up and continuous reorganisation of its production systems is a critical planning task for every enterprise in the global market. The growing cross-linking of material flows, shortened product development and life cycles, and more product variety require planning to be done at increasingly frequent intervals. At the same time, the structure and dynamics of production systems make the task more complex because of a higher degree of interdependency between the individual process elements and more complex decision rules. Furthermore, unplanned events that disturb carrying out an optimised plan need to be addressed during planning, ramp up and operation of a production system.

The 15th ASIM Dedicated Conference on Simulation in Production and Logistics at the Heinz Nixdorf Institute of the University of Paderborn highlights the role of simulation as an instrument for decision support from planning, ramp-up as well as operation of complex production and logistics systems. While simulation is firmly established as a tool for planning in many companies, it can also provide important impulses for a continuously improvement during ramp-up and operation. Many new application areas and research topics present themselves, from issues such as persistent modelling to the technical integration as a decision support tool.

These conference proceedings provide insight into current methodical trends and developments and demonstrate examples of good practice in over 70 articles written by 160 authors. In two industrial keynotes, authors from different fields describe possible applications and future perspectives of simulation from a practical point of view. The academic keynote provides a broad vision of integral digital engineering beyond simulation. Various applications of simulation such as semiconductor production, container terminal logistics, intralogistics or One-of-a-kind production are covered in the proceedings, as well as aspects of validation & verification, modelling of sustainability issues, personal planning simulation or combining simulation with methods of optimization. We wish the reader a pleasurable time browsing, consulting and reading these proceedings.

Paderborn, October 2013

Prof. Dr.-Ing. habil. W. Dangelmaier
Dr. Christoph Laroque
Alexander Klaas

Inhaltsverzeichnis

KEYNOTES
KEYNOTES

Wettbewerbsvorteil Simulation – Ein produktlebenszyklenorientiertes Konzept
De Backer, Philippe; Kopecki, Lukas; Lödige Industries GmbH *1*

Quo vadis Ablaufsimulation – Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie
Mayer, Gottfried; BMW AG;
Pöge, Carsten; Volkswagen AG *11*

Ganzheitliches Digital Engineering
Spath, Dieter; Universität Stuttgart und Fraunhofer IAO;
Burger, Thomas; Fraunhofer IAO;
Ilg, Rolf; Universität Stuttgart;
Lentes, Joachim; Fraunhofer IAO *21*

DIGITALE FABRIK
DIGITAL FACTORY

Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion
Krückhans, Björn; Meier, Horst; Ruhr-Universität Bochum *31*

Digitale Klinikplanung - Reibungsloser Betrieb durch Simulation
Matysczok, Carsten; Schele, Moritz; UNITY AG;
Wilson, Heike; DUALIS GmbH IT Solution *41*

Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik - Die neue VDI-Richtlinie 4499-4
Zülch, Gert; Karlsruher Institut für Technologie *53*

Mobile devices and applications for factory planning and operation
Bracht, Uwe; Brosch, Patrick; Fleischmann, Anna-Charlotte; TU Clausthal *61*

SIMULATION UND OPTIMIERUNG
SIMULATION AND OPTIMISATION

Optimierungsmethoden der Reihenfolgeplanung mit Hilfe von Simulation
Jósvai, János; Széchenyi István Universität *71*

Grafisches Werkzeug zur Erstellung von Optimierungsalgorithmen für komplexe Montagesysteme
Bohn, Daniel; Angelidis, Evangelos; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München *77*

Simulationsbasierte Reihenfolgeoptimierung von Fertigungsaufträgen für Montagesysteme mittels eines genetischen Algorithmus unter Beachtung von Reihenfolgebeschränkungen
Lemessi, Marco; John Deere GmbH & Co. KG;
Schulze, Thomas; Tänzer, Christian; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg .. 87

Systemische Fertigungsprozessmodellierung und -optimierung mit integrierter Simulation
Grienitz, Volker; Hausicke, Michael; Görzel, Stefan; Universität Siegen 99

SIMULATION IN DER HALBLEITERFERTIGUNG
SIMULATION IN SEMICONDUCTOR PRODUCTION

Fabriksimulation als Schlüssel zur Beherrschung der Komplexität in einer hochautomatisierten Halbleiterfertigungslinie
Scholl, Wolfgang; Infineon Technologies Dresden GmbH 109

The Impact of Accuracy in Lot Arrival Prediction on Solution Quality for the Parallel Batch Machine Scheduling Problem in Wafer Fabrication
Kohn, Robert; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München..... 121

Real life evaluation of a model-based combined dispatching approach at a low-volume high-mix ASIC facility
Gißrau, Mike; X-FAB Dresden;
Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München 133

LOGISTIK UND TRANSPORTNETZWERKE
LOGISTICS AND TRANSPORTATION NETWORKS

Serviceorientierte Referenzarchitektur für Logistische Assistenzsysteme zur simulationsbasierten Entscheidungsunterstützung
Kamphues, Josef; Groß, Sven; Korth, Benjamin; Zajac, Markus; Hegmanns, Tobias; Fraunhofer IML 145

Entwicklung eines integrierten Ansatzes für das Störungsmanagement in komplexen Transportnetzen unter Berücksichtigung variabler Störungsdauern
Dreßler, Daniel; Beißert, Ulrike; Fraunhofer IML 157

Effizienzsteigerung für Routenzüge - Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität
Staab, Tobias; Galka, Stefan; Klenk, Eva; Günthner, Willibald A.; TU München. 167

Simulation of a logistics network for the import of goods with unknown risk for strengthening security in supply chains
Hellingrath, Bernd; Böhle, Carsten; Middelhoff, Michael; Westfälische Wilhelms-Universität Münster 177

NACHHALTIGKEIT
SUSTAINABILITY

Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation
Schlegel, Andreas; Stoldt, Johannes; Putz, Matthias; Fraunhofer IWU *187*

Modellierung und Simulation von Getränkeabfüll- und Verpackungsanlagen unter Berücksichtigung von Energie- und Medienverbräuchen
Forster, Theo; Krones AG *197*

DISTRIBUTION UND INTRALOGISTIK
DISTRIBUTION AND INTRALOGISTICS

Entwicklung und Analyse einer multikriteriellen Einsatzsteuerung von Staplern in einem manuell bedienten Distributionslager
Clausen, Uwe; Dabidian, Peiman; Diekmann, Daniel; Goedicke, Ina; Pöting, Moritz; TU Dortmund *207*

Selbststeuernde Logistik im Umlaufmanagement von Verleihartikel
Harjes, Florian; BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen;
Scholz-Reiter, Bernd; Universität Bremen *217*

Simulationsgestützte, Selbstadaptierende Wissensbasierte Steuerung von logistischen Systemen
Klaas, Alexander; Laroque, Christoph; Renken, Hendrik; Dangelmaier, Wilhelm; Universität Paderborn *227*

SPEZIELLE SIMULATIONSANWENDUNGEN
SPECIFIC APPLICATIONS

Using Simulation to compare Aircraft Boarding Strategies
Fonseca i Casas, Pau; Universitat Politècnica de Catalunya;
Juan, Angel A.; Open University of Catalonia;
Mas, Silvia; Autonomous University of Barcelona *237*

Einlastung von Montageaufträgen: Von der Simulation zur Integration in das operative Planungssystem der Fa. Nobilia
Köhne, Hermann; Nobilia-Werke J. Stickling GmbH & Co. KG;
Gutenschwager, Kai; Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften und SimPlan AG *247*

SpeedDeBlock - ein allgemeines generisches Blockade-Management System
Wendt, Karsten; Zettl, Reik; Wilson, Heike; DUALIS GmbH IT Solution *259*

Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess – Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau
Drescher, Benny; TU München;
Stich, Peter; Fraunhofer IWU;
Kiefer, Jens; Strahilov, Anton; Bär, Thomas; Daimler AG;
Reinhart, Gunther; TU München / Fraunhofer IWU *271*

HAFENLOGISTIK
CONTAINER TERMINAL LOGISTICS

Bausteinbasierte Simulation des Ladungsumschlags in trimodalen Containerterminals
Eckert, Carsten; Teitge, Philipp; TU Berlin;
Steinhauer, Dirk; Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG *283*

Entwicklung von Prioritätsregeln für Umschlagvorgänge in Binnenhafencontainerterminals mittels Simulation
Clausen, Uwe; Kaffka, Jan; TU Dortmund *293*

Effiziente und flexible Modellierung der Logistik an Bord von Schiffen und in Gebäuden
Steinhauer, Dirk; Soyka, Michael; Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG;
Hübler, Michael; Center of Maritime Technologies e.V. *305*

PERSONALORIENTIERTE SIMULATION
PERSONAL PLANNING

Leistungsabstimmung von Montagesystemen auf der Basis von Personaleinsatzgraphen
Gamber, Thilo; Leupold, Michael; Zülch, Gert; Karlsruher Institut für Technologie *315*

Einsatz der Simulation zur Evaluation von Personaleinsatzplanungsergebnissen
Müller, Christian; Koç, Emre; Universität Duisburg-Essen;
Mouelhi, Mohamed; SDZ GmbH;
Özgür, Çağdaş; Noche, Bernd; Universität Duisburg-Essen *325*

Simulation-based Optimization for Complex Assembly Lines with Workforce Constraints
Angelidis, Evangelos; Bohn, Daniel; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München;
Carl, Sebastian; TU Dresden *337*

SIMULATION UND VISUALISIERUNG
SIMULATION AND VISUALISATION

Nutzung von Realdaten in Simulationsmodellen durch industrielle Bildverarbeitung
Koç, Emre; Alias, Cyril; Kalkan, Yakup; Noche, Bernd; Universität Duisburg-Essen;
Stange, Carsten; SDZ GmbH *349*

Anwendung einer agentenbasierten Steuerungsarchitektur zur Mikromontage
Schlette, Christian; Roßmann, Jürgen; RWTH Aachen *361*

Die 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation – Stellenwert und Entwicklungstendenzen
Schmitz, Markus; Wenzel, Sigrid; Universität Kassel *373*

VALIDATION UND VERIFIKATION
VALIDATION AND VERIFICATION

Ein Ansatz zur Verifikation von Materialflusssystemen durch Model Checking
Turek, Karsten; TU Dresden;
Klotz, Thomas; Fraunhofer IIS;
Schmidt, Thorsten; TU Dresden;
Straube, Bernd; Fraunhofer IIS *385*

Der Einfluss von Autokorrelation in komplexen Materialflusssystemen
Rank, Sebastian; Schmidt, Thorsten; TU Dresden;
Uhlig, Tobias; Universität der Bundeswehr München *395*

METHODEN, VERFAHREN UND TOOLS
METHODS, TECHNIQUES AND TOOLS

Simulative Algorithm Analysis in Online Optimization with Lookahead
Dunke, Fabian; Nickel, Stefan; Karlsruher Institut für Technologie *405*

From space to manufacturing industry: New approaches of eRobotics to serve todays and future manufacturing needs
Roßmann, Jürgen; Guiffo Kaigom, Eric; Atorf, Linus; Schlette, Christian; RWTH Aachen *417*

Development of a Simulation-based Optimisation Environment for a Capacitated Multi-Echelon Production-Inventory System
Güller, Mustafa; Noche, Bernd; Universität Duisburg-Essen *427*

Hybrid Models of Queuing Networks in Matlab: Experiences in Modeling, Simulation and Data Analysis
Huber, Daniel; Arizona State University *437*

Leistungsbewertung von Fertigungssystemen durch normierte Betriebskennlinien
Weigert, Gerald; TU Dresden *447*

Ressourcenverteilung in mesoskopischen Simulationsmodellen für Produktions- und Logistiknetzwerke
Hennies, Til; Reggelin, Tobias; Tolujew, Juri; Fraunhofer IFF und Otto-von-Guericke-Universität *459*

Multikriterielle Entscheidungsunterstützung für die Synthese von Herstellprozessen zur Fertigung funktional gradierter Bauteile
Rudtsch, Vinzent; Gausemeier, Jürgen; Petersen, Marcus; Universität Paderborn *469*

Ein Ontologie-basierter Modellierungs- und Simulationsansatz am Beispiel der ressourceneffizienten Planung spanender Prozessketten
Schmidt, Artur; Pawletta, Thorsten; Hochschule Wismar *481*

SIMULATION VON UNIKATPROZESSEN
SIMULATION OF ONE-OF-A-KIND PRODUCTION

Konzept eines simulationsbasierten Assistenzsystems zur Risikoabsicherung in Großprojekten - Am Beispiel des Großanlagenbaus und der Bauindustrie
Wagenitz, Axel; Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg;
Cirullies, Jan; Schwede, Christian; Beißert, Ulrike; Fraunhofer IML *491*

A Petri net-based simulation model for the flexible modelling and analysis of building construction processes
Samkari, Kais; Franz, Volkhard; Universität Kassel *505*

Simulationsgestützter Kraneinsatzplaner für Hochbauprojekte
Astour, Habeb; Franz, Volkhard; Universität Kassel *515*

Ansatz zur simultanen Durchführung statistischer Versuchspläne mittels farbiger Petri-Netze zur Simulation von Bauprozessen im Hochbau
Samkari, Kais; Franz, Volkhard; Universität Kassel *525*

Methodik für ein simulationsgestütztes logistikintegriertes Projektmanagement im Anlagenbau
Wenzel, Sigrid; Universität Kassel;
Laroque, Christoph; Universität Paderborn *537*

Modellierung und Simulation unscharfer und unsicherer baulogistischer Randbedingungen auf Basis der Fuzzy-Theorie
Szczesny, Kamil; König, Markus; Ruhr-Universität Bochum;
Laußat, Lars; Helmus, Manfred; Bergische Universität Wuppertal *549*

Multiagentensimulation in komplexen Logistiksystemen am Beispiel der Baustellenlogistik
Franke, Hubertus; Hochschule Ostfalia *559*

SIMULATION BEI DER PRODUKTIONSPLANUNG
SIMULATION FOR ADVANCED PLANNING & SCHEDULING

Ein simulationsbasiertes Assistenzsystem zur Pflege von Dispositionsparametern eines ERP-Systems im laufenden Betrieb
Stumvoll, Ulrike; Hochschule Regensburg;
Nehls, Uwe; Jade Hochschule;
Claus, Thorsten; TU Dresden / IHI Zittau *569*

Fabrikmodelle für Job-Shop-Scheduling-Algorithmen in Changing-Steady-State-Systemen
Rabe, Markus; Deininger, Maik; TU Dortmund *579*

Simulationsbasierte Kapazitätsabschätzung in einem Modell der Auftragsfreigabe mit Berücksichtigung von Servicegraden
Lange, Frederick; Herrmann, Frank; Hochschule Regensburg;
Claus, Thorsten; TU Dresden / IHI Zittau *591*

Simulationsbasiertes Assistenzsystem zur Bewertung, Auswahl und Konfiguration von PPS-Methoden für mittelständische Produktionsdienstleister - Anforderungen, Systemkonzeption und Anwendungsperspektiven
Brodhun, Christoph; Teich, Enrico; TU Dresden;
Claus, Thorsten; TU Dresden / IHI Zittau *601*

Scheduling in a Flexible Job Shop with Continuous Operations at the Last Stage
Zhang, Tao; Rose, Oliver; Universität der Bundeswehr München *611*

Linking deterministic aggregate production planning with a stochastic simulation model using a planned utilization factor
Felberbauer, Thomas; Altendorfer, Klaus; Jodlbauer, Herbert; Upper Austria University of Applied Sciences *621*

Simulationsbasierte Ermittlung von Kapazitätsbelastungsfaktoren zur Produktionsprogrammplanung
Englberger, Julian; Herrmann, Frank; Hochschule Regensburg;
Claus, Thorsten; TU Dresden / IHI Zittau *631*

Combining Simulation with Heuristics to solve Stochastic Routing and Scheduling Problems
Juan, Angel A.; Open University of Catalonia;
Rabe, Markus; TU Dortmund *641*

STEUERUNG VON PRODUKTIONSSYSTEMEN
MANUFACTURING CONTROL

Wertstromorientierte Produktionssteuerung durch webbasierte Simulation
Schuh, Günther; Potente, Till; Hauptvogel, Annika; Thomas, Christina; Müller, Christiane; RWTH Aachen *651*

Interaktives Montageplanungssystem zur Online-Leistungssteuerung
März, Lothar; STREMLER AG *661*

Simulationsgestützte Feinplanung im Produktionsumfeld - vom SAP zur SPS
Höppe, Norbert; Reis GmbH & Co. KG Maschinenfabrik;
Seeanner, Florian; SimPlan Systems GmbH;
Spieckermann, Sven; SimPlan AG *669*

Autonomous Control in Production Networks under Stochastic Influence
Boyaci, Pinar; Robert Bosch GmbH;
Wenzel, Sigrid; Universität Kassel *679*

WORKSHOP "SIMULATION IN IT-SERVICEMANAGEMENT"
WORKSHOP "SIMULATION IN IT-SERVICEMANAGEMENT"

Simulation komplexer (IT) Service-Infrastrukturen
Winkler, Joachim; Heisig, Benjamnin; synetics GmbH;
Schmidtmann, Achim; Fachhochschule Dortmund *689*

Generierung eines Simulationsmodells auf Basis einer CMDB
Kruse, Thorsten; Schmidtmann, Achim; Fachhochschule Dortmund *699*

Analyse der Dienstgüte in komplexen IT-Service-Infrastrukturen mittels Simulation
Gunia, Benjamin; Schmidtmann, Achim; Fachhochschule Dortmund *709*

Konzeptionelle Entwicklung einer Business Simulation für COBIT
Fritsch, Martin; Müller-Feuerstein, Sascha; Hochschule Ansbach;
Groß, Rainer; TH Nürnberg Georg Simon Ohm *721*

WORKSHOP "EMULATION: FALLBEISPIELE ZU VIRTUELLER INBETRIEBNAHME"
WORKSHOP "EMULATION: CASE STUDIES IN VIRTUAL RAMP-UPS"

Emulation als Werkzeug in der Entwicklung von Steuerungssoftware
Fleisch, Ruth; Schöch, Robert; Prante, Thorsten; V-Research GmbH;
Pflegerl, Robert; Schelling Anlagenbau GmbH *731*

Methoden zur teilautomatischen Generierung von Emulationsmodellen
Meyer, Torben; Volkswagen AG;
Straßburger, Steffen; TU Ilmenau *741*

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Wettbewerbsvorteil Simulation – Ein produktlebenszyklenorientiertes Konzept

Competitive Advantage Simulation – A Life Cycle Based Approach

Philippe De Backer, Lukas Kopecki, Lödige Industries GmbH, Scherfede (Germany), l.kopecki@lodige.com

Abstract: The impacts from decisions, made during the product life cycle of complex projects, especially in the air cargo terminal domain, are hard to estimate in the earlier planning phases. Such projects have strict restrictions given by several entities, like the customer or the government, that have to be fulfilled. Simulation guided decision making helps to find a reasonable solution for the given restrictions and the final material flow within an air cargo terminal. This article gives an overview how to adapt the idea behind the simulation guided decision making and its benefits, based on simulation and visualization, into the life cycle planning of complex projects in the air cargo terminal domain.

1 Lödige Industries GmbH

Das Unternehmen, Lödige Industries GmbH, wurde 1948 von Alois Lödige in Paderborn gegründet und war zum damaligen Zeitpunkt spezialisiert auf Hebebühnen.

1965 wurde der Firmensitz nach Warburg/Scherfede verlegt und neue Produktionshallen gebaut. Daraufhin erweiterte das Unternehmen Lödige seine Produktpalette auf Förder- und Lagertechnik.

Das erste Luftfrachtprojekt folgte 1975 am Flughafen Schiphol, Amsterdam.

Das Produktspektrum umfasst weiterhin die automatisierten Car Parking Systeme. Sie ermöglichen es Fahrzeuge z. B. durch Aufzüge und Verteilfahrzeuge auf geringem Raum zu deponieren und automatisiert zu entnehmen. 2014 wird in Aarhus, Dänemark, das größte vollautomatische Parkhaus in Europa von Lödige fertiggestellt.

Das Unternehmen beschäftigt 900 Mitarbeiter weltweit bei einem Jahresumsatz von 110 Millionen Euro. Die Geschäftstätigkeit erstreckt sich über 40 Ländern.

2 Einleitung

Komplexe Fördertechnische Lösungen, wie Luftfrachtterminals, erfordern zur Abfertigung der Luftfracht spezielle Lösungsansätze für die Dimensionierung und die Zukunftsplanung. Ihre Untersuchung ist zu komplex oder zu teuer am realen System. Resultierend daraus erhalten Simulationen, in dieser Domäne, einen immer höheren Stellenwert zur Lösungsfindung und Validierung.

Die Komplexität zeichnet sich aus der Dynamik des Systems, das den Transport von verschiedenartige Frachttypen, deren Prioritäten und Bearbeitungsstrategien bewerkstelligen muss.

Die Simulation unterstützt bei der Validierung und Auswahl der Techniken und Maschinen für die Komponenten des Terminals.

Dieser Artikel beschreibt die Erstellung und Nutzung eines Simulationsmodells zur Planungsunterstützung der einzelnen Lebenszyklenphasen eines Gebäudes anhand eines Luftfrachtterminals.

3 Luftfrachtterminals

Ein Luftfrachtterminal ist ein Gebäude zur Abwicklung von Fracht zwischen Flugzeuge und LKWs. Die Abbildung 1 veranschaulicht grob die Struktur eines Luftfrachtterminals.

Die Ein- bzw. Ausgänge gliedern sich in Land- und Luftseite. Die Luftseite beschreibt die Schnittstelle zum Vorfeld und das Transportieren von Fracht zwischen dem Flugzeug und dem Terminal. Die Landseite dient sowohl dem Be- und Entladen der Fracht in LKWs zum Weitertransport. Die An- und Abflugzeit der Flugzeuge und die An- und Abfahrten der LKWs, sowie die transportierte Fracht beeinflussen maßgeblich die Auslastung des Terminals.

Die Fracht gliedert sich in mehrere Typen. Die reguläre Fracht und die spezielle Fracht, wie Gefahrengut oder schnell verderbliche Lebensmittel. Die spezielle Fracht wird gesondert abgearbeitet und hat meist eine höhere Priorität gegenüber der regulären Fracht. Beide Frachttypen werden an den Schnittstellen der Land- und Luftseite ver- und beladen. Bevor die Fracht auf das Flugzeug geladen werden kann, wird sie an einer Bearbeitungsstation in ein ULD(Unit Load Device) konsolidiert. Dies sind spezielle Container die im Flugzeug verladen und gesichert werden können. Die Bearbeitungsstation ist ein Element in der Förderstrecke in der die Fracht in ein ULD konsolidiert (verladen und gesichert) bzw. beim Abbauen aus ihr entnommen wird.

Die Förderstrecken bestehen aus mehreren Elementen, deren Aufgabe der Transport, das Sortieren und Konsolidieren der Fracht ist. Das Sortieren erfolgt abhängig des Flugzeugs, in speziell dafür vorgesehene Puffern an der Luftseite. Ziel ist es die Flugzeugwartezeit zu minimieren.

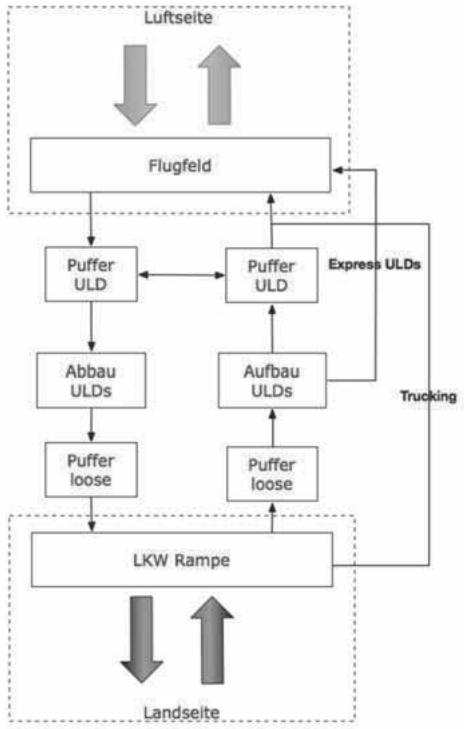


Abbildung 1: *Grobes Konzept eines Luftfrachtterminals mit zwei beispielhaften Flüßen.*

Die drei Hauptprozesse des Terminals sind der Import, der Export und der Transit. Der Import beschreibt die Einfuhr von Fracht in ULDs durch Flugzeuge, der Export die Ausfuhr der konsolidierten Fracht in ULDs in einem Flugzeug und der Transit das Umlagern und Weitertransportieren von Fracht von einem Flugzeug zu einem weiteren.

Mehrere Fragestellungen treten hierbei auf:

- Wie muss die Förderstrecke strukturiert werden?
- Wieviele Schnittstellen werden an der Luft / Landseite benötigt?
- Wie hoch ist die Bearbeitungszeit an den Bearbeitungsstationen?
- Kann das System bei Peakzeiten die Zeitslots der Flugzeuge und LKWs erfüllen?

Hierbei bietet die Simulation eine Hilfestellung. Sie erlaubt das Simulieren von mehreren Dimensionierungen und Strategien zur Bestimmung der einzelnen Komponenten des Luftfrachtterminals.

4 Simulation

Zur Analyse und Validierung des Luftfrachtterminals dienen diskrete Ereignis-Simulationen. Diese basieren auf der Zustandsveränderung durch Ereignisse.

Ein Zustand beschreibt den aktuellen Status des Terminals. Dies ist z. B. die Anzahl und der Frachttyp zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer Bearbeitungsstation. Ein Ereigniss z. B. ist die Ankunft eines Flugzeuges mit seiner bestimmten Menge Fracht, gegliedert in verschiedene Frachttypen.

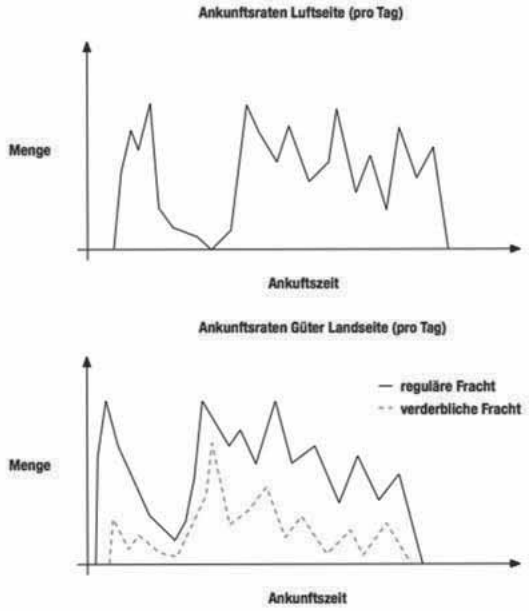


Abbildung 2: *Ankunftsraten der Flugzeuge auf der Luftseite und die Ankunftsraten, von regulärer und verderblicher Fracht, an der Landseite.*

Abbildung 2 stellt die Ankunftsraten der Flugzeuge auf der Luftseite (Abbildung 2 Oben) und die Ankunftsraten der regulären und verderblichen Fracht durch LKWs auf der Landseite dar (Abbildung 2 unten).

Die Abbildung zeigt das typische Verhalten eines Luftfrachtterminals das spezialisiert auf Frachter ist. Die einzelnen Peaks resultieren aus der großen Menge an Fracht die dieser Flugzeugtyp transportiert. Im Gegensatz zu Passagierflugzeugen die für eine gleichmäßigeren Verteilung der Fracht sorgen.

Die Ankunftsraten der Landseite sind phasenverschoben zu den Ankunftsraten der Luftseite. Die entsteht durch das Abstimmen von LKW Fahrplänen auf die Flugzeuge. Fracht wird typischerweise zwei bis sechs Stunden vor Abflug angeliefert und zwei bis vier Stunden nach Landung abgeholt.

Der erste Schritt für die Planung und Erstellung eines Simulationsmodells ist die Erstellung eines Materialflusses um die einzelnen größen der Flüsse an den Stationen, innerhalb des Terminals, bestimmen zu können.

4.1 Materialflussanalyse

Die Materialflussanalyse dient zum Erfassen der Frachtflüsse der Frachttypen an den Ein- und Ausgängen der einzelnen Stationen.

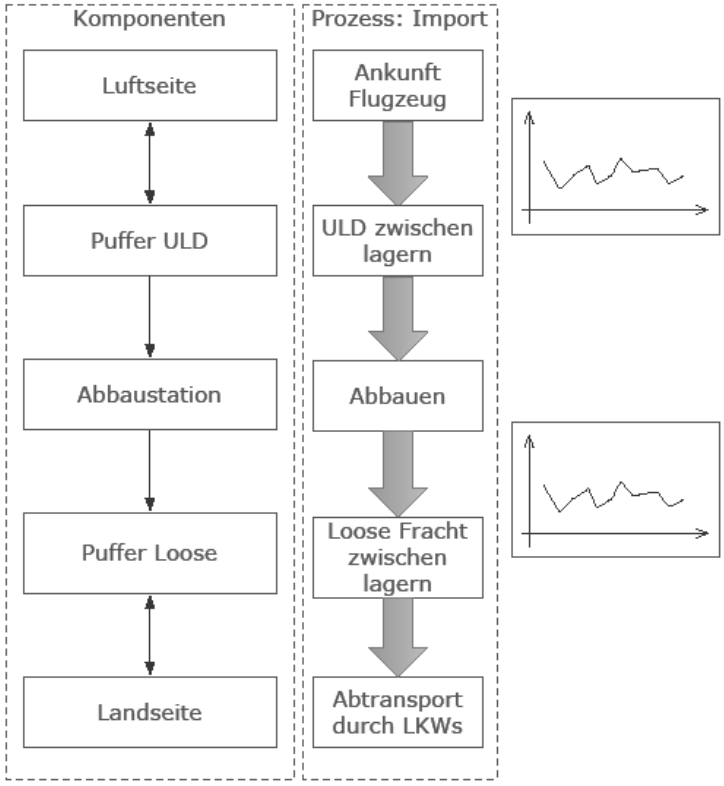


Abbildung 3: *Materialflussmodell eines Fördertechnikbereiches.*

Die Abbildung 3 zeigt den Vorgang für den Import von Fracht an der Luftseite.

Zu Beginn werden die ULDs aus dem Flugzeug entladen und im Puffer zwischengespeichert. Im nächsten Schritt werden die ULDs an eine freie Bearbeitungsstation transportieren. Die ULDs werden dort geöffnet und die Fracht entnommen. Sie wird nach den zugehörigen LKWs sortiert und in einem Lager, für die Abholung, bereitgestellt.

Neben dem Import, beschreibt der Export das Kommisionieren der Fracht in ULDs und das Verladen auf Flugzeugen. Das dritte Verfahren, der Transit, das Verladen von ULDs von einem Flugzeug auf ein anderes für den Weitertransport.

Das Ziel ist das Herleiten der Kennzahl der zu erzielenden Durchsätze für jeden Frachttyp an jeder Komponente.

Die ermittelten Durchsätze bilden die Restriktionen für die Bestimmung der Techniken der einzelnen Stationen innerhalb des Simulationsmodelles um ein

gegebenes Servicelevel zu gewährleisten. Diese werden, anhand der Peaks, für jeden Frachttypen, der an einer Bearbeitungsstation ankommt, bestimmt.

4.2 Modellfindung

Ein Simulationsmodell ist ein spezielles Modell um eine konkrete Problemstellung eines Systems zu abstrahieren und diese mithilfe eines Simulators zu simulieren.

Ein Beispiel für eine Problemstellung ist die Dimensionierung der Förderstrecke und der Stationen im Luftfrachtterminal.

Zu Beginn wird ein Modell zur Repräsentation des Systems erstellt. Hierbei werden die ermittelten Kennzahlen der Materialflussanalyse herangezogen und Maschinen bzw. Techniken gewählt, die den Ein- und Ausgangsfluss der Stationen bewältigen können.

Zusätzlich zu den ermittelten Kennzahlen, der Materialflussanalyse, müssen weitere Restriktionen wie z. B. räumliche Ausrichtung / Begrenzung oder das zur Verfügung stehenden Investitionsvolumen, betrachtet werden. Diese haben Einfluss auf die Bestimmung der Maschinen, auf das Einsetzen von Techniken und die Wahl der Strategien zur Umsetzung der Fördertechniken der einzelnen Frachtflüsse.

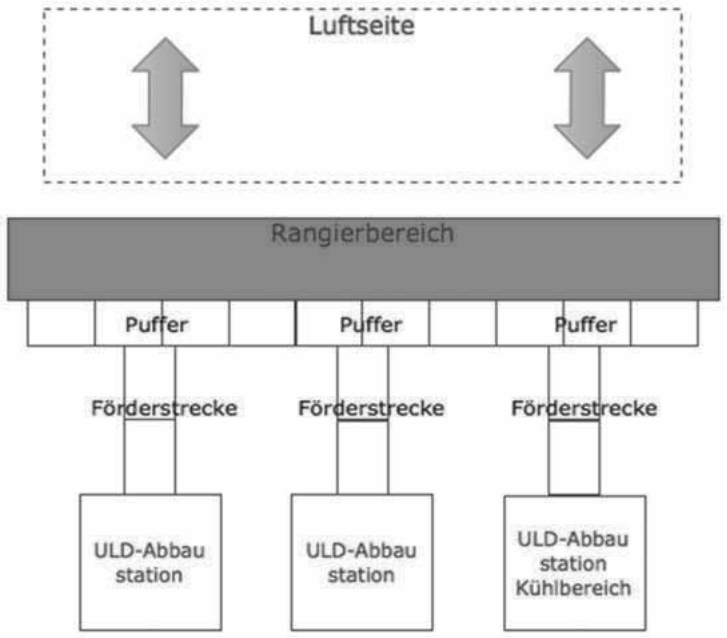


Abbildung 4: *vereinfachtes Simulationsmodell für das Abfertigen der Luftseite.*

Abbildung 4 beschreibt die Abfertigung des Flugzeugs auf der Luftseite. Hierbei werden, für die Fracht, zehn Pufferzonen gewählt. Sie entkoppeln den Transport auf der Luftseite von den weiteren Förder- und Lagertechniken im Terminal. Drei Förderstrecken ermöglichen das Transportieren der Fracht zu den ULD-

Abbaustationen. Die beiden linken Abbaustationen dienen zum Abbau der regulären Fracht und die rechte Station für das Abbauen von verderblicher Fracht. Dazu können temperaturgeführte Terminalbereiche genutzt werden.

Die Simulation bietet für diesen Bereich Aufschluss, ob weitere Pufferzonen oder weitere Förderstrecken benötigt werden und wie die spezielle Fracht abgearbeitet werden soll um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

4.3 d³fact

Das erstellte Simulationsmodell wird in einem weiteren Schritt in eine Simulationssoftware eingepflegt und dann simuliert z. B. mit d³fact.

d³fact entstand in Kooperation mit den Forschungsgruppen Wirtschaftsinformatik, insbesondere CIM und Algorithmen und Komplexität der Universität Paderborn. Es ermöglicht das Simulieren von Simulationsmodellen durch diskreter Ereignis-Simulation.

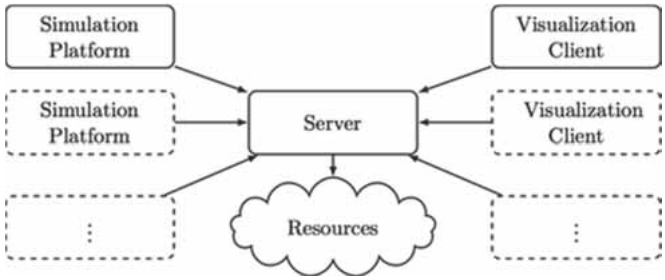


Abbildung 5: *die drei Hauptkomponenten von d³fact.*

Abbildung 5 zeigt die drei Hauptkomponenten von d³fact. Die erste Komponente ist die Simulationsplatform und beinhaltet den Simulationskernel und das Simulationsmodell. Es dient zur Simulation des Modells.

Die zweite Komponente ist der Visualisierungsclient, dieser dient der Darstellung der Simulation. Ziel ist die visuelle Validierung des Modells und des Ablaufs der implementierten Funktionen.

Der Server ist die dritte Komponente und stellt eine Schnittstelle zwischen dem Visualisierungclient und der Simulationsplatform dar. Damit wird sichergestellt, dass die Simulation unabhängig von der Visualisierung, bei z. B. einem Programmabbruch, weiterläuft.

Die Ergebnisse der Simulation bieten eine Hilfestellung bei der Wahl der einzelnen Komponenten sowie der Validierung des Terminals auf Einhaltung der Restriktionen.

5 Produktlebenszyklenorientierte Simulation

Der Produktlebenszyklus eines Gebäudes unterteilt sich in die Bauphase, die Nutzungsphase und den Rückbau.

Die Bauphase umfasst die Planung und Errichtung des Gebäudes. Hierbei liegen die Investitionskosten zur Errichtung des Gebäudes im Fokus.

Die Nutzungsphase beginnt nach der Errichtung und mit der Nutzung des Gebäudes bis zum Rückbau. Ziel ist es mit minimalen Aufwand (z. B. für Energie und Personal) den Betrieb störungsfrei zu bewerkstelligen.

Der Rückbau beschreibt den Abriss des Gebäudes. Hierbei spielt der Aufwand und die daraus resultierenden Kosten eine Rolle. Diese spiegeln sich in der Art des Abrisses, z. B. Sprengen, Einreißen oder Demontieren, sowie dem Ressourcenrückgewinn oder bei Weiternutzung des Gebäudes in der Art der Umstrukturierung des Terminals.

Das Hauptaugenmerk der Simulation liegt initial in der Bauphase und im weiteren Verlauf in der Simulation der Nutzungsphase. Verschiedene Strategien und Szenarien, die im regulären Betrieb eingesetzt werden, können simuliert und validiert werden.

In der Bauphase hilft die Simulation bei der Optimierung des Baus des Gebäudes und in der Bestimmung der Phasierung. Die Phasierung beschreibt die Unterteilung des Gebäudes in Bauphasen. Die erste Phase beschreibt das Gebäude in einem einsatzbaren Zustand, der nicht die volle Leistung bzw. Durchsatz erzielt. Die weiteren Phasen bauen auf der ersten Phase auf und beschreiben meist die Erweiterung des Gebäudes um weitere Elemente, wie zusätzliche Förderstrecken oder Bearbeitungsstationen zum Verarbeiten der ULDs.

Die Phasierung ermöglicht die Reaktion auf eine Veränderungen der Auslastung, innerhalb der Nutzungsphase, des Terminals. Bei einem frühzeitigen Anstieg der Auslastung kann der Bau vorgezogen werden, um einen weiteren störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

Für die Simulation der Nutzungsphase werden verschiedene Szenarien mit den jeweiligen Parametern definiert.

Im Bereich Luftfrachtterminals sind gängige Szenarien:

- das sichere Transportieren von einer bestimmten Menge Sonderfracht innerhalb einer bestimmten Zeit unter Beachtung besonderer Vorschriften;
- der Transport von Express-Fracht und die Auswirkung auf die Verarbeitung der regulären Fracht;
- das Lagern und Abarbeiten von verderblicher Ware, z. B. Fische;
- saisonelle Schwankungen des Frachttyps und deren Aufkommen.

Von Bedeutung sind die, meist vom Kunden, definierten Ankunftsraten von Flugzeugen und deren Ladung sowie auf der Landseite die LKWs und deren Fracht. Ziel ist das Erfüllen aller gegebenen Bedienungen (z. B. Durchlaufzeiten). Dabei geben Ankunftsraten eine Projektion des Frachtaufkommens gesehen auf ein bestimmtes Zeitfenster in der Zukunft wieder.

Das initial generierte Simulationsmodell wird mit den definierten Szenarien und den implementierten Strategien simuliert. Es wird versucht, anhand eines Ziels, zu optimieren. Das Durchlaufen der Simulation und anschließende Verändern des Simulationsmodells sorgt für eine Rückkoppelung in die Bauphase, um diese ebenfalls zu validieren.

Die Simulation wird solange durchlaufen bis eine zufriedenstellende Lösung für das Luftfrachtterminal gefunden wurde. Das validierte Simulationsmodell kann in der Planung in eine CAD-Software übernommen und weiter verfeinert werden. Verfeinerungen wären Elemente des Terminals die keine Auswirkungen auf das Simulationsergebnis haben.

Der Rückbau muss bei Flughafenterminals nicht immer in einen Abbau des Terminals zur konsequenz haben, sondern kann durch eine Umnutzung weiter genutzt werden. Dabei können neue Flugzeugtypen oder neue Frachttypen in Betracht gezogen werden.

Die Simulation gibt anschließend Aufschluss über den Durchsatz und die Wahl der Lagerstrategien bei Umnutzung des Lagers.

5.1 Reaktion auf Veränderungen

Bei Projekten, die eine große Vorlaufzeit benötigen, verändern sich meist Restriktionen in der Planungsphase. In der Luftfrachtdomäne z. B. kann die Bauzeit, eines Terminals, fünf Jahre betragen.

Problematisch ist daher die Frage ob sich die Investition in ein Luftfrachtterminal auf 20 oder mehr Jahre lohnt. Dabei ist ungewiss inwieweit sich die Ankunftsraten und die Wachstumsraten verändern und welche Zeitslot beim Verladen der Flugzeuge eingehalten werden müssen.

Die Simulation von Szenarien (Stresstests) helfen bei der Analyse um Aussagen über die Belastbarkeit, des Terminals, treffen zu können. Dabei werden mögliche Szenarien, wie bspw. die Bearbeitung von neuen Flugzeugtypen mit mehr Laderaum, durchgespielt oder neue Strategien für den Umbau, um einen neuen Frachttypen bearbeiten zu können.

Die Stresstest helfen bei der Findung von Engpässen um Entscheiden zu können ob das Terminal den Anforderungen entspricht, es Umgebaut oder die nächste Planungsphase gebaut werden muss.

Zusätzlich können weitere Szenarien betrachtet werden, wie die Mandantennutzung in Terminals. Ein Beispiel ist der Zusammenschluss, am 01. Juli 2007, der Fluggesellschaften Lufthansa und SWISS, der zufolge hatte das beide Fluggesellschaften ihre Terminals untereinander genutzt haben. An den Terminals, beider Fluggesellschaften, entstand ein erhöhtes Frachtaufkommen. Zusätzlich dazu entstanden weitere Restriktionen, die die Mandantennutzung ermöglichen. Eine Restriktion ist die technische Trennung von Fracht in den Terminals.

Bereits definierte Simulationsmodelle haben den Vorteil, dass eine Anpassung der Restriktionen keine großen Auswirkungen auf die Implementierung hat. Sie führen dazu, dass das bestehende Modell angepasst und neu Durchlaufen werden muss.

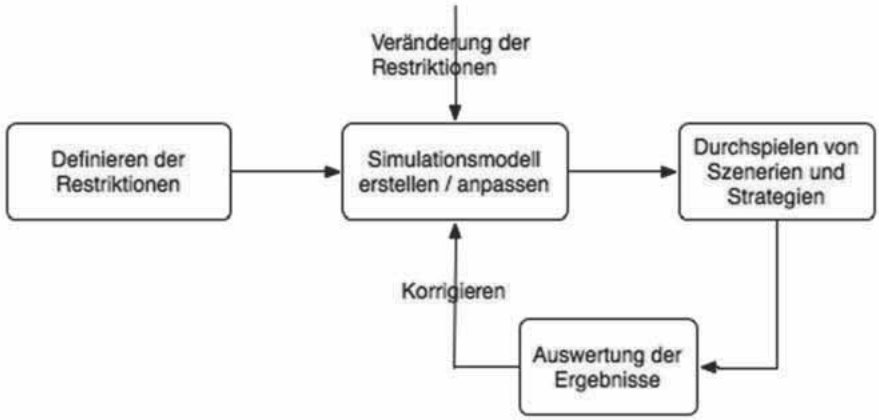


Abbildung 6: *Lebenszyklus der Simulation mit Veränderungen der Restriktionen.*

Abbildung 6 beschreibt die weiterführende Verwendung der Simulation trotz Veränderungen der Restriktionen.

6 Fazit

Das einbeziehen der Simulation in die Planungsphase gibt Hilfestellung bei der Umsetzung des Projektes.

Hierbei kann neben der Erstplanung, für die Realisierung der aktuellen Bedürfnisse, eine Bewertung durch Veränderungen der Szenarien durchgeführt werden und mehrere Produktänderungen durchgespielt werden.

Stresstests helfen bei der Bestimmung der maximalen Auslastung des Systems und bei der Entscheidungsfindung für die Planung des Terminals. Sie bieten Hilfestellung durch das Verändern des Simulationsmodelles um eine Struktur für das System zu finden, das die vorgegebenen prognostizierten Durchsätze ermöglicht.

Neben den prognostizierten Durchsätzen können weitere Szenarien Durchgespielt werden um das System feiner Bewerten zu können. Hierbei können Veränderungen des Marktes durchgespielt werden, bspw. das einführen eines Nachtflugverbotes. Dies hat zur Folge das die Zeiten für das Verladen sich verkürzt haben, um weiterhin den Durchsatz zu erzielen.

Die Simulation bietet Sicherheit und ermöglicht das Erstellen von robusteren Terminals, die auf zukünftige Szenarien besser reagieren zu können.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Quo vadis Ablaufsimulation – Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie

Quo vadis material flow simulation – visions for the future from the view of the automotive industry

Gottfried Mayer, BMW AG, München (Germany), gottfried.mayer@bmw.de
Carsten Pöge, Volkswagen AG, Wolfsburg (Germany),
carsten.poege@volkswagen.de

Abstract: This document depicts - from the automotive point of view - a vision, where the material flow simulation should evolve into in the future. After a short introduction it describes some challenges the automotive industry actually faces and wants to give an initial point for discussing the regarding responses.

1 Einleitung

Die Ablauf- oder Materialflusssimulation ist mittlerweile ein etabliertes Werkzeug zur Planung und Absicherung von diversen Systemen und Entscheidungen geworden. Es wurden zahlreiche Entwicklungen und Forschungen rund um das Thema betrieben, es existieren viele Anwendungen, von der Standardsoftware bis hin zu Open Source Lösungen. Auch die Rechnerleistung ist in den letzten Jahren so gestiegen, dass auch umfangreiche Simulationen mittlerweile mit Standardrechnern zu beherrschen sind.

Dies wirft die Frage auf, ob das Themenfeld der Ablaufsimulation bereits „fertig" erforscht und in den Regelbetrieb übergegangen ist oder ob es nach wie vor Handlungsbedarf gibt.

Dieser Beitrag soll, aus Sicht der Automobilindustrie, im speziellen der VDA (Verband der Automobilindustrie) Arbeitsgruppe Ablaufsimulation, zeigen, dass die Entwicklung der Methoden und Werkzeuge der Ablaufsimulation noch längst nicht am Ende des Weges angekommen ist und an welchen Stellen aus unserer Sicht aktuell Handlungsbedarf besteht.

2 Einordnung innerhalb der Simulation

Häufig ist die erste Herausforderung, wenn man sich mit dem Thema der Anwendung der Simulation beschäftigt, dass der Begriff der Simulation zwar in aller Munde ist, aber im schlimmsten Falle jeder eine andere Simulationsart meint. Beispielsweise

werden folgende Simulationsarten häufig allgemein mit dem Begriff Simulation bezeichnet:

- Ablaufsimulation oder Materialflusssimulation
- Finite Elemente Methode (FEM)
- Kinematik-Simulation
- Geometriesimulation
- Physiksimulation
- Humansimulation
- Spiele-Simulation
- „Kartonagensimulation“
- …

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass hier genaue Definitionen und Abgrenzungen der einzelnen Ausprägungen von Simulationen notwendig sind. Aber nicht nur die Überbegriffe sind klar zu definieren, auch innerhalb dieser benötigt man klare Unterscheidungen. Als Beispiel hierfür sei die Materialflusssimulation genannt, die zum einen als Synonym für die Ablaufsimulation verwendet wird, zum anderen wird dieser Begriff aber auch als 3D Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme oder für die vereinfachte Darstellung des Materialflusses innerhalb der Geometriesimulation verwendet.

3 Ablaufsimulation und die Digitale Fabrik

Die Methode der Ablaufsimulation kann im Planungsprozess in den größeren Kontext der Digitalen Fabrik eingeordnet werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei ihre Vernetzung mit den Planungssystemen, die aus Sicht der Ablaufsimulation Daten bereitstellen und mir anderen Simulationssystemen, mit denen sie interagieren kann.

3.1 Einordnung der Ablaufsimulation in der Digitalen Fabrik

Als Teil der Digitalen Fabrik hat das Thema Ablaufsimulation die engsten Berührungspunkte mit der Prozess- und der Fabrikplanung, von denen Sie Daten zur Parametrierung ihrer Modelle bezieht und deren Planungsergebnisse sie absichern kann. Soweit die Theorie. Betrachtet man die Software- Lösungen der großen Systemanbieter im Umfeld der Digitalen Fabrik, so bietet nahezu jeder eine Lösung zur Ablaufsimulation an. Aber mit der Integration in die Datenbackbones der Digitalen Fabrik tut man sich schwer.

Hier ist dringender Handlungsbedarf gegeben, da die Beherrschbarkeit immer komplexerer Fertigungen ohne Ablaufsimulation kaum mehr gegeben ist.

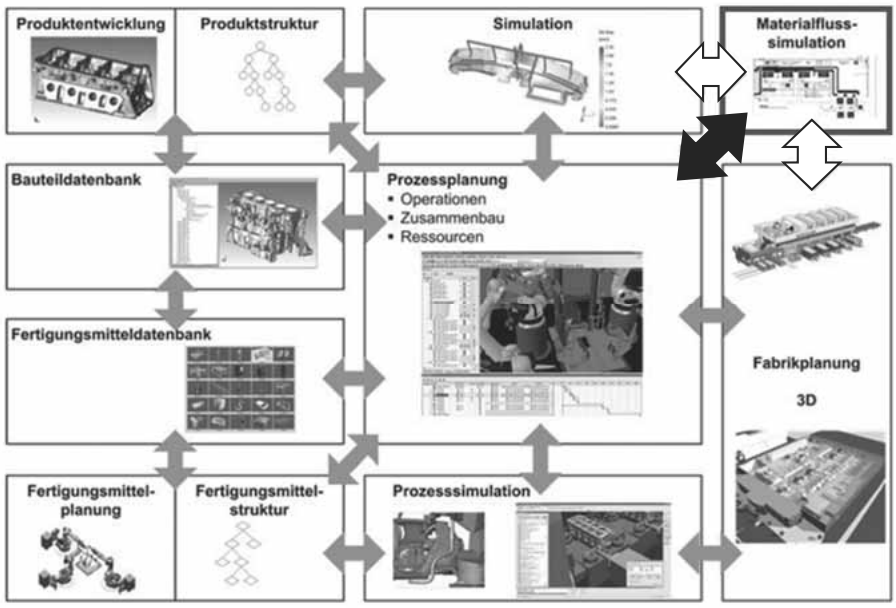


Abbildung 1: *Einordnung der Materialflusssimulation im Umfeld der Digitalen Fabrik [Bracht 2011]*

3.2 Datenaustausch innerhalb der Digitalen Fabrik

Um die Ablaufsimulation wirklich in die Digitale Fabrik einzubinden müssen, wie bei jedem anderen Werkzeug der Digitalen Fabrik auch, die Schnittstellen und Datenströme klar definiert sein. So sollte in Zukunft klar sein, welcher Bereich der Digitalen Fabrik welche Daten liefern muss und wer die Hoheit über die Daten hat. Aus Sicht der Ablaufsimulation seien hier exemplarisch folgende Hoheiten genannt:

- Auslegung und Dimensionierung von Schutzkreisen
- Komponentenverfügbarkeiten
- Dynamische Traces für die 3D Visualisierung

Zum Austausch der Daten werden derzeit proprioritäre Schnittstellen – meist zwischen nur zwei Systemen – verwendet. Dies hat den Nachteil, dass die Anzahl der Schnittstellen, und damit der Aufwand der Pflege, mit jedem neuen Kopplungspartner wächst. Um diesen wachsenden Aufwand in Zaum zu halten, wird es nötig sein, auf neutrale, generische Schnittstellen umzustellen. Hier gibt es im Umfeld der eXtensable Markup Language, kurz XML, einige vielversprechende Ansätze, wie z. B. Automation ML oder CMSD (Core Manufacturing Simulation Data).

3.3 Visualisierung

Eine weitere Fragestellung, die im Umfeld der Ablaufsimulation vermehrt auftritt, ist die Frage nach der Visualisierung im Simulator. Soll diese sinnvollerweise in 2D oder 3D erfolgen? Diese Fragestellung ist so pauschal nicht zu beantworten. So wie es im Automobilbau größtenteils 2D Ablaufsimulations- Modelle gibt, gibt es im Schiffbau größtenteils 3D Modelle.

Eine einfache Hilfestellung für die Entscheidung, ob eine Visualisierung der in der Ablaufsimulationsstudie abgebildeten Prozesse in 2D oder 3D erfolgen soll, kann hier eine Aufwand / Nutzen Kalkulation bringen. Bisher wurde der Aufwand im Automobilbau in Relation zu dem zu erwartenden Nutzen meist als deutlich zu hoch eingeschätzt und die Entscheidung daher oft sehr schnell getroffen.

Diese scheinbare Einfachheit der Entscheidung täuscht aber über das eigentliche Problem hinweg: Warum ist der Aufwand zur Erstellung eines 3D Simulationsmodells so hoch? Und eine zweite Frage sei erlaubt: Ist die 3D Visualisierung im Simulationswerkzeug überhaupt sinnvoll, oder wäre es besser, die Visualisierung in einem separaten Visualisierungsprogramm – evtl. in Kombination mit (Bewegungs-)Daten aus anderen Systemen der Digitalen Fabrik – vorzunehmen? In einzelnen Projekten konnte durch die Visualisierung der Ablaufsimulation in einer externen 3D-Umgebung bereits ein Nutzen hinsichtlich eines besseren Verständnisses der abgebildeten Prozesse erzielt werden [vgl. Masik 2012]. Außerdem sollte die Frage erlaubt sein, ob nicht der Einsatz einer 3D-Visualisierung mit dem Ziel eines besseren Marketings für das Simulationsprojekt insgesamt nicht auch einen nicht zu vernachlässigenden Nutzen darstellt.

Da dieses Problem jedoch eigentlich eine Ebene höher, also in der Digitalen Fabrik angesiedelt ist, wird hier eine einheitliche Visualisierungsstrategie benötigt. Bei dieser müssen auch die Belange der Simulationen berücksichtigt werden. Tatsache ist, selbst wenn er zusätzliche Nutzen einer 3D Visualisierung gegenüber der „klassischen" 2D-Darstellung nur gering ist oder diese nur in wenigen Projekten einen Mehrwert bietet, so kann durch eine deutliche Reduzierung des Aufwandes zur Erstellung von 3D Visualisierungen das Kosten / Nutzen Verhältnis positiv beeinflußt werden. Eine „3D-Visualisierung als Abfall-/Neben-Produkt" würde vermutlich in deutlich mehr Projekten vorgenommen werden.

4 Time to market – Das Problem mit der „Durchlaufzeit"

Ein großes Problem, das oft im Bereich der Ablaufsimulation vorzufinden ist, ist dass der Kunde häufig nicht einschätzen kann, wie lange eine Simulationsstudie – oder besser die Absicherung eines Planungsergebnisses mit Hilfe der Ablaufsimulation oder einer anderen geeigneten Methode – dauern wird. Dies hängt meist damit zusammen, dass der Aufwand der Datensammlung, sowie der Verifikation und Validierung [vgl. Rabe 2008], und der Aufwand der statistischen Absicherung unterschätzt werden. Dieses Kapitel soll ein paar Gedankenanstöße geben, wie die „Durchlaufzeit" einer Simulationsstudie in Zukunft verkürzt werden könnte.

4.1 Einsatz alternativer Lösungsmöglichkeiten

Zwei Fragen, die leider viel zu selten gestellt werden, lauten: „Ist die betreffende Fragestellung überhaupt simulationswürdig? Und, falls ja, welche Art der Simulation ist die richtige für die Fragestellung?"

Die Tatsache, daß alternative Lösungsmöglichkeiten nicht in Erwägung gezogen werden, führt unweigerlich zu dem Problem, dass zum Teil viele Simulationsstudien erstellt werden, deren Ziele in Wirklichkeit mit zum Teil erheblich einfacheren

Mitteln erreicht werden könnten. Dadurch werden Simulationskapazitäten gebunden, die aus Sicht der Ablaufsimulation sinnvoller eingesetzt werden könnten.

Als Simulationsexperte freut man sich zwar, wenn die Nachfrage nach Simulationen groß ist, aber eine Lösung, im einfachsten Fall mit einer Tabellenkalkulation oder einem anderen geeigneten statischen Verfahren ist für Fragestellungen ohne stochastischem Anteil, oder bei unvollständigen oder wenig präzisen Eingangsdaten häufig ausreichend.

Dieser Punkt ist aus akademischer Sicht bereits intensiv ausgeleuchtet worden, findet aber leider in der Industrie wenig Zuspruch, da diese Methoden nicht so bekannt sind, wie die Materialflusssimulation. Hier muss noch „Aufklärungsarbeit" geleistet werden, dass der Simulationsexperte das richtige Werkzeug aussucht und hier nicht pauschalisiert werden darf.

4.2 Optimierung von Simulationsstudien

Ist die Frage nach der Simulationswürdigkeit geklärt und das richtige Werkzeug bestimmt, beginnt die eigentliche Simulationsstudie.

Für Simulationsstudien existieren diverse Vorgehensmodelle, eines davon zeigt die Abbildung 2 [vgl. Mayer 2012].

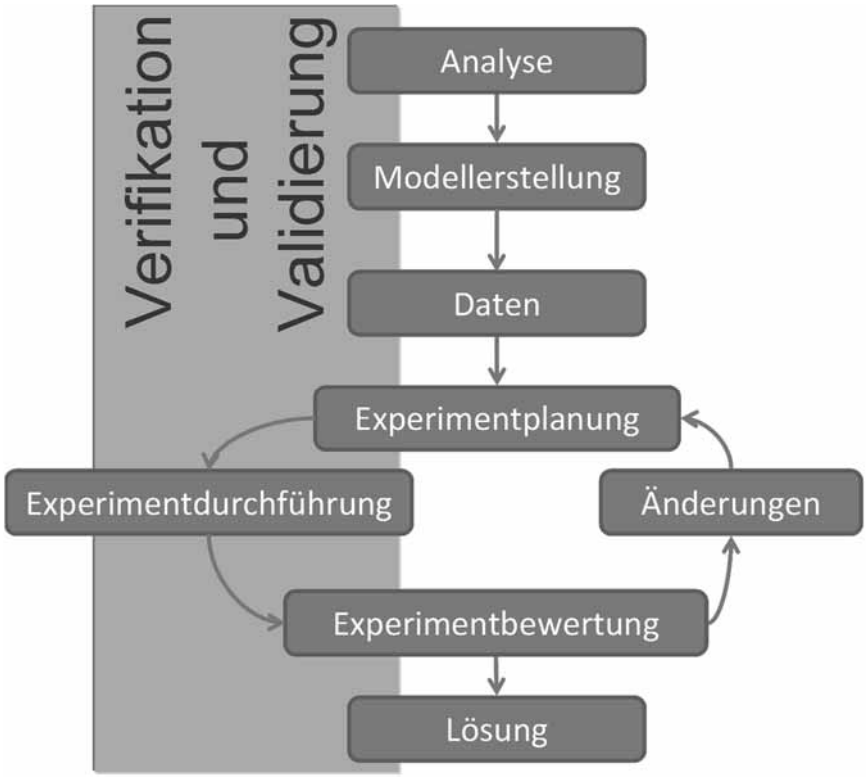


Abbildung 2: *Vorgehensmodell nach AssistSim/EDASim, Hessen Agentur Partnertag, 2009*

Die VDA Arbeitsgruppe Ablaufsimulation hat in diesem Modell den Teil der Experimentplanung bis hin zur Lösung als Wertschöpfung der Ablaufsimulation definiert.

Betrachtet man den Zeitaufwand für eine Simulationsstudie, so erkennt man schnell, dass der Bereich der Wertschöpfung bei Weitem nicht den größten Teil der Studie selbst einnimmt (Abbildung 2). Im Gegenteil, betrachtet man die Zeitscheiben über die Umfragejahre hinweg, so erkennt man sogar, dass der Zeitaufwand für wertschöpfende Tätigkeiten abnimmt.

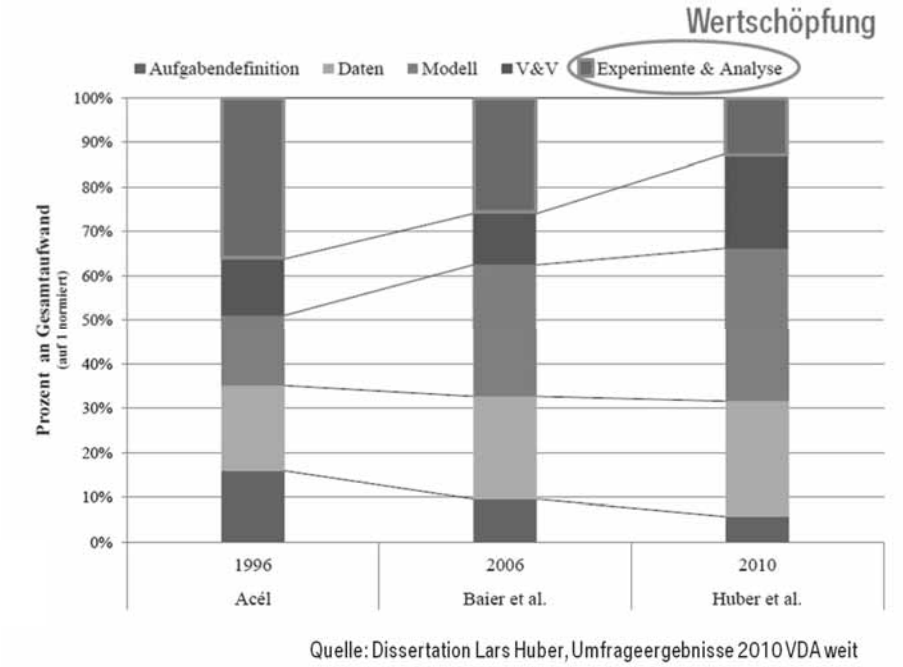


Abbildung 3: *Aufwand bei Simulationsstudien, Dissertation Lars Huber, 2012*

Gründe hierfür sind vor allem in den gesteigerten Anforderungen aus dem Wettbewerb der Automobilproduzenten zu sehen. Daraus resultieren immer mehr Derivate (Typen), zum Teil auch auf den gleichen Produktionslinien produziert, mehr Varianten pro Derivat, vermehrt internationale Produktions- und Logistik-Netzwerke, höhere Bebauungsdichte in den Werken und Produktionshallen, neue Steuerungskonzepte bis hin zu komplett neuen Produktionskonzepten und auch neue Vertriebskonzepte. Dies hat folgende Auswirkungen auf die Ablaufsimulation:

- Steigende Komplexität
- Höherer Detaillierungsgrad
- Anstieg des Umfanges der benötigten Eingangsdaten

Ein Instrument dem entgegenzuwirken kann hier kann ein optimierter Workflow sein, der aber im Moment noch nicht vollständig gegeben ist. Hierfür ist es zuerst einmal unabdingbar, dass die Ablaufsimulation als feste Größe in die Planungsprozesse integriert ist. Dadurch wird erreicht, dass kein Meilenstein der Planung erreicht

werden kann, ohne dass zumindest geprüft wurde, ob das Planungsergebnis durch eine Simulationsstudie abgesichert werden soll.

Eine Integration in den Planungsprozess löst aber das Problem der geringen Wertschöpfung nicht.

Nach wie vor die größte Herausforderung der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie liegt im Bereich der Eingangsdaten. Die benötigten Daten liegen derzeit meist inhomogen und nicht immer vollständig vor. Hier ist es nötig, innerhalb der Digitalen Fabrik Lösungen anzubieten, die eine singuläre Bereitstellung für alle in den Systemen vorhandenen Daten vorsieht. Ist dies erfolgt, so muss eine (teil-)automatische Datenübernahme möglich sein. Dieser sollte eine explizite Methode zur Plausibilisierung der Werte (Vollständigkeit, Richtigkeit) zur Seite stehen.

In engem Zusammenhang mit den benötigten Daten ist – natürlich unter Berücksichtigung der zu beantwortenden Fragestellung – die Wahl des richtigen Detaillierungsgrades zu sehen. Hier muß aus Sicht der Verringerung der Projektlaufzeit der Grundsatz „so detailliert wie nötig, so grob wie möglich“ gelten.

Stehen die Planungsdaten in der gewünschten Güte bereit, so ist es auch möglich, Simulationsmodelle mit Hilfe einer (teil-)automatischen Modellgenerierung zu erzeugen und so den Zeitaufwand der Modellerstellung zu reduzieren. Momentan fehlt in diesem Umfeld derzeit noch die Möglichkeit, Daten aus unterschiedlichsten Planungssystemen automatisch zu Verknüpfen.

Ein weiterer Punkt, der zu einer Steigerung der Wertschöpfung beitragen kann, ist eine Unterstützung des Simulationsexperten beim Experimentdesign und bei der Experimentdurchführung. Hier sollten auch gezielt Algorithmen eingesetzt werden, die eine Lösungsfindung beschleunigen.

Zu guter Letzt sollte es möglich sein, Ergebnisauswertungen teilautomatisch durchzuführen. Die Erfahrung zeigt, dass etwa 50% der benötigten Auswertungen immer wieder gleich sind. Somit könnten diese Ergebnisse, in die richtige Form gebracht, ohne zusätzlichen Aufwand zugängig gemacht werden.

Der wichtigste Punkt bei allen genannten Optimierungsmöglichkeiten, ist, die Validierung und Verifikation möglichst einfach und effizient anwendbar zu machen.

4.3 Interoperabilität von Simulatoren

Um die Rolle der Ablaufsimulation in Zukunft weiter zu stärken, wird es nötig sein, die Interoperabilität zu anderen Simulations-Sparten herzustellen oder weiter auszubauen.

Als Beispiel sei hier die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) genannt, die in unterschiedlichen Hierarchiestufen durchgeführt werden kann. So ist es meist notwendig, eine VIBN für eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit einer eigens dafür entwickelten Software durchzuführen. Eine Inbetriebnahme der übergeordneten Steuerung (die sogenannte Emulation [vgl. Grillitsch 2010, Mayer 2006]), bei der es darum geht, nicht eine Steuerung, sondern einen Bereich oder ein ganzes Gewerk abzubilden, kann aber durchaus mit den Werkzeugen der Ablaufsimulation durchgeführt werden.

Da derzeit die Nachfragen für eine hybride Verwendung der o.g .Methodiken besteht, wird es Zunehmens wichtiger, dass die unterschiedlichen Werkzeuge kompatibel zueinander sind oder gemacht werden.

5 (Immer wieder) Standards

Die Standardisierung der Ablaufsimulation schreitet voran, aber ist sie überhaupt sinnvoll? Aus Sicht der VDA Arbeitsgruppe ist sie nicht nur sinnvoll, sondern notwendig, wenn man die Ablaufsimulation kontinuierlich und nachhaltig betreiben will. Auch wenn der Abstimmungsaufwand, der zu Beginn einer Standardisierung notwendig ist, oft zäh und langwierig ist, so ist sie unabdingbar, um eine Mindestqualität der Modelle sicherzustellen und eine langfristige Pflege und Wartung der Modelle zu ermöglichen [vgl. Mayer 2010a].

Ein Punkt, der dabei bedacht werden muss, ist, dass vereinheitlichte Objekte viel größer sein und mehr Funktionen enthalten können, als nativ für einen einzelnen Verwendungszweck erstellte. Daher sollte der Aufbau des Standards wohl durchdacht sein, so dass er auch mit angemessenem Aufwand anwendbar ist und der Anwender nicht durch zu hohe Komplexität überfordert wird.

Ein zentral wichtiger Punkt für alle Standardisierungsaktivitäten ist, wieder einmal, die Dokumentation. Ohne eine umfangeiche Dokumentation, die alle Bausteine und Funktionen vollständig beschreibt und Schulungsunterlagen, die einen Einstieg in das Werkzeug ermöglichen, ist ein Standard nichts wert, da er von den Anwenden nicht akzeptiert werden wird.

Für die Ablaufsimulation ist eine Standardisierung hinsichtlich folgender Punkte in Arbeit oder angedacht:

- Bausteine innerhalb des Simulators
- Schnittstellen zu Planungssystemen
- Schnittstellen zu externen Visualisierungssystemen
- Aufbau der Modelle, Modellierungsrichtlinien
- Qualitätskriterien
- Validierung und Verifikation
- Dokumentationsumfänge

Für den Erfolg von Standardisierungsvorhaben ist es wichtig, dass die unterschiedlichen Gremien, die sich mit dem Themenfeld beschäftigen, intensiv zusammenarbeiten und alle Betroffenen angemessen eingebunden werden. Aus Sicht der Ablaufsimulation innerhalb der Automobilindustrie sind das die VDA Arbeitsgruppe Ablaufsimulation, der VDI (Verein Deutscher Ingenieure) und die ASIM (Arbeitsgemeinschaft Simulation der GI, Gesellschaft für Informatik e. V.).

Welche Nachteile hat nun das Thema Standardisierung? Hier wäre zu nennen, dass für den Anwender ein Einarbeitungsaufwand entsteht, seine persönliche Freiheit bei der Modellerstellung eingeschränkt wird und er – je nach seinem persönlichen Skill-Level und der Aufgabenstellung – unter Umständen einen höheren zeitlichen Aufwand durch die Verwendung des Standards in Kauf nehmen muss.

Demgegenüber sind als Vorteile zu nennen: Die langfristige Pflege und Wartung der Simulationsmodelle wird überhaupt erst durch die Verwendung von Standards ermöglicht. Ein Support der Anwender bei Problemen mit dem Werkzeug und eine

Qualitätskontrolle der u.U. extern erstellten Modelle sind mit deutlich geringerem Aufwand verbunden, wenn die verwendeten Bausteine innerhalb des Simulators gleich sind. Zusätzlich können Modelle an andere Kollegen ohne große Einarbeitung übergeben und ggf. zu größeren (Gesamt-)Modellen kombiniert werden. Und, der wichtigste Punkt, das Wissen der Simulationsexperten ist leichter aufzubauen, zu erhalten und ggf. auf weitere Anwender übertragbar.

Aus der Abwägung der gennannten Vor- und Nachteile ist in den vergangenen Jahren eine in der Automobilindustrie weit verbreitete Standard-Bibliothek für Simulationsobjekte entstanden – der VDA Automotive Bausteinkasten [vgl. Mayer, 2010b]. Inzwischen wird die Anwendung dieser Bibliothek unterstützt durch diverse Dokumente, wie z.B. eine umfassende, mehrsprachige Dokumentation, umfangreiches Schulungsmaterial und Ausführungsanweisungen für die Durchführung von Simulationsprojekten. In der Zukunft wird der VDA Automotive Bausteinkasten ein Kernelement der Simulationsstrategie der beteiligten Unternehmen bilden.

6 Neue Anwendungsfälle (Forschungsprojekte)

Ein wichtiger Schlüssel zum Erfolg der Ablaufsimulation war schon immer die Zusammenarbeit von Forschung und Industrie. Diese Kooperation wird auch die Zukunft weiter bestimmen.

Einen wertvollen Beitrag kann diese Zusammenarbeit bei neuen Anwendungsfällen liefern, die derzeit in der Automobilindustrie noch nicht im Fokus stehen. Als Beispiele wären hier zu nennen:

- Simulation von Verbrauchswerten (Energiesimulation): In diesem Feld sind zwar die ersten Schritte bereits gemacht, aber eine vollständige Abbildung aller Energie- und Medienverbräuche, deren Erzeugungen und ggf. auch der zu ihrer Bereitstellung notwendigen Infrastruktur ist derzeit noch nicht möglich. Zusätzlich wäre es interessant zu untersuchen, ob durch die Kopplung verschiedener Simulatoren für unterschiedliche Anwendungsbereiche – zum Beispiel von Modellen der Belüftungssimulation einer Produktionshalle und der Ablaufsimulation der in dieser Halle installierten Produktionsanlage – ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn erzielt werden kann.
- Simulation von Bautätigkeiten: Da auch in der Automobilindustrie viel und oft gebaut wird, wird dieses Feld der Ablaufsimulation sicherlich in den Fokus rücken. Vor allem, wenn die Bautätigkeit in einem aktuell betriebenen Werk stattfindet, hat die Bau-Logistik u. U. einen Einfluss auf die Produktionslogistik.
- Simulation von Personenströmen: Durch die steigende Bebauungsdichte innerhalb der Werken und der Hallen in den einzelnen Fabriken entsteht immer mehr die Frage: Ist es noch möglich, die Arbeiter zum Schichtwechsel ohne große Probleme an ihre Arbeitsplatze zu bringen? Was passiert im Notfall?

Anhand dieser beliebig erweiterbaren Liste ist schnell ersichtlich, dass es auch in Zukunft Bedarf an intensiver Zusammenarbeit zwischen Forschung und Technik geben wird. Hier wird der Erfolg natürlich daran gemessen werden, wie viele der Forschungsprojekte und Kooperationen dann auch Eingang in die Simulationsanwendungen der Automobilindustrie finden. Dabei wird die gemeinsame Aufgabe darin bestehen, nicht nur Forschungsprojekte durchzuführen, sondern diese

auch, bei positiven Ergebnissen, zur Umsetzung in der Praxis und zur Anwendung in der Industrie zu bringen.

7 Zusammenfassung

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass schon viele kleine und große Schritte zur Professionalisierung des Einsatzes und zur Erweiterung der Anwendungsgebiete der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie gegangen wurden, aber immer neue Aufgaben, Herausforderungen und Simulationsarten zeigen, dass das Themenfeld der Ablaufsimulation immer noch nicht fertig erforscht und vollständig in die Anwendung gebracht wurde. Dieser Beitrag hat daher bei weitem nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, er soll vielmehr zur Motivation beitragen, das Thema immer wieder zu hinterfragen und wenn nötig, neu zu definieren.

Literatur

Bracht,U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele. Berlin: Springer 2011

Masik, S.; Pöge, C.: Virtuelle Abläufe, realer Nutzen - Mit virtueller Realität Materialflüsse in der Autoindustrie planen. Digital Engineering Magazin 5/2012

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

Mayer, G.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Steigerung der Produktivität in Simulationsstudien mit Assistenzwerkzeugen. ZWF 3/2012

Grillitsch, U.; Mayer, G.: Auf dem Weg zum Standard – Virtuelle Inbetriebnahme von IT-Steuerungssystemen in der Produktionssteuerung. Karlsruhe: Tagungsband zur ASIM Fachtagung 2010

Mayer, G.; Burges, U.: Virtuelle Inbetriebnahme von Produktions-steuerungssystemen in der Automobilindustrie mittels Emulation. Kassel: Tagungsband zur ASIM Fachtagung 2006

Mayer, G.; Spieckermann, S.: – Life-cycle of simulation models: requirements and case studies in the automotive industry. Journal of Simulation No. 4/2010

Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. Karlsruhe: Tagungsband zur ASIM Fachtagung 2010

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Ganzheitliches Digital Engineering

Integral Digital Engineering

Dieter Spath, Universität Stuttgart und Fraunhofer IAO, Stuttgart (Germany), dieter.spath@iao.fraunhofer.de

Thomas Burger, Fraunhofer IAO, Stuttgart (Germany), thomas.burger@iao.fraunhofer.de

Rolf Ilg, Universität Stuttgart, Stuttgart (Germany), rolf.ilg@iat.uni-stuttgart.de

Joachim Lentes, Fraunhofer IAO, Stuttgart (Germany), joachim.lentes@iao.fraunhofer.de

Abstract: Industrial companies have to cope with increasing challenges arising from the need for flexibility and innovation in products and processes. This contribution gives an insight in elements of an integral Digital Engineering to support enterprises to address the resulting requirements. Therefore, after an introduction highlighting some of the challenges for and requirements on enterprises, the integrated engineering of products and the related production systems is addressed. Based on this, an introduction into the development of solutions, i.e. product-service-combinations is given, before the Centre for Virtual Engineering ZVE is introduced.

1 Herausforderungen an produzierende Unternehmen

Industrieunternehmen sind zur Sicherstellung ihrer Wettbewerbsfähigkeit gezwungen, in immer kürzeren Abständen neue Produkte am Markt anzubieten und sich über Innovation und Mehrwert von Wettbewerbern zu differenzieren. Damit sinken auch die Zeiten, die den Unternehmen für die Entwicklung und Realisierung von Produkten und Produktionssystemen zur Verfügung stehen. Die Produkt- und Produktionsentwicklung in Unternehmen ist im Gegensatz dazu häufig durch stark arbeitsteilige, funktionsorientierte Strukturen, fragmentarische Vorgänge und informationstechnische Insellösungen geprägt. Darüber hinaus nutzen noch zu wenige Unternehmen die Möglichkeit, sich über produktbegleitende Dienstleistungen zu differenzieren und über das damit entstehende Lösungsangebot Mehrwert für Kunden und Wettbewerbsvorteile für sich zu realisieren. Erfolg versprechende Ansätze zur Verbesserung der Situation und damit zur Bewältigung der Herausforderungen an produzierende Unternehmen können unter dem Begriff „ganzheitliches Digital Engineering“ subsumiert werden. Dieses muss die abgestimmte, integrierte Entwicklung von Produkt, seiner Produktion und des entsprechenden

Dienstleistungsangebots, eventuell mit begleitenden Geschäftsmodellen umfassen. Ausgangspunkt der Betrachtungen dieses Beitrags ist die integrierte Produkt- und Produktionsentwicklung, die anschließend um eine dienstleistungsbezogene Komponente erweitert wird. Abschließend wird das Zentrum für Virtuelles Engineering in Stuttgart vorgestellt, in dem Fragestellungen des ganzheitlichen Digital Engineering beforscht und entsprechende Lösungen entwickelt werden.

2 Integrierte Produkt- und Produktionsentwicklung

Zur Integration der Entwicklung eines Produkts und seiner Produktion sind mehrere Ebenen zu adressieren: Mensch, Organisation und Technik. An der Prozesskette von der Idee eines Produkts bis zu seiner Produktion sind eine Vielzahl von Experten mit verschiedenen fachlichen und oft kulturellen Hintergründen aus unterschiedlichen Organisationseinheiten und zum Teil auch unterschiedlichen Organisationen beteiligt. Damit diese Beteiligten zweckmäßig kooperieren können, müssen sie dazu in der Lage sein, miteinander zu kommunizieren, was häufig durch die unterschiedlichen Hintergründe erschwert wird. Zur Kommunikationsunterstützung ist nicht nur der Einsatz von Informationstechnik, beispielsweise von Technologien des Social Web, sinnvoll, sondern auch von zum Teil relativ einfachen organisatorischen („weichen“) Maßnahmen wie Projekttreffen und die Einführung gemeinsamer Projektwörterbücher. Zweckmäßig kann auch die Einführung eines festen Projektteams mit Mitgliedern aus allen an der Produktentstehung und -realisierung beteiligten Fachdisziplinen sein, das während des gesamten Vorgehens bestehen bleibt, wobei je nach Prozessphase die einzelnen Teammitglieder mehr oder weniger aktiv agieren.

Auf organisatorischer Ebene muss ein Gesamtprozess zur Produktentstehung und -realisierung geschaffen werden, der aus den verschiedenen Organisationen und Organisationseinheiten quasi eine virtuelle Organisation formt, also ein möglichst nahtloser Prozess über organisatorische Grenzen hinweg. Unterstützt werden kann dieser Prozess unter anderem durch eine eindeutige Prozessdokumentation, die möglichst geringen Interpretationsspielraum bietet und informationstechnische Unterstützung in Form von Workflowsystemen, die den Prozessablauf mit steuern können. Zur Strukturierung des Prozesses können bekannte Ansätze wie Phasenmodelle oder Quality-Gates eingesetzt werden.

Die Integration auf technischer Ebene betrifft insbesondere die Vielzahl der in der Produkt- und Produktionsentstehung eingesetzten Informationssysteme. Ziel muss es hierbei nicht zwangsläufig sein, alle, oder zumindest alle wesentlichen Systeme in ein ganzheitliches System zu integrieren, da der von der resultierenden Komplexität stammende Aufwand häufig den erzielten Nutzen übersteigt. Zweckmäßig kann auch sein, gezielt Informationsflüsse zwischen Systemen zu realisieren, wo sie notwendig und nutzenbringend sind, beispielsweise um Redundanzen und Fehler durch manuelle Datenübernahmen zu vermeiden. Neben Informationsflüssen zwischen Systemen ist der Zugriff auf vorhandene Informationen wesentlich. Diese müssen bei Bedarf mit möglichst wenig Aufwand gefunden bzw. abgerufen und nötigenfalls ausgewertet werden können.

Im Rahmen des vom Fraunhofer IAO initiierten und geleiteten EU-geförderten Vorhabens „advanced platform for manufacturing engineering and PLM“ (amePLM) wird ein System zur Adressierung der drei zur integrierten Produkt- und

Produktionsentwicklung zu betrachtenden Ebenen entwickelt. Es basiert auf einer offenen Engineering-Plattform und unterstützt den Zugriff auf verteilte Informationen und Softwaresysteme sowie durchgängige Arbeitsabläufe. Ein Kernelement des Systems ist eine Ontologie als interoperables Datenmodell und gemeinsames Projektwörterbuch. Die resultierende Grobarchitektur ist in Abbildung 1 dargestellt.

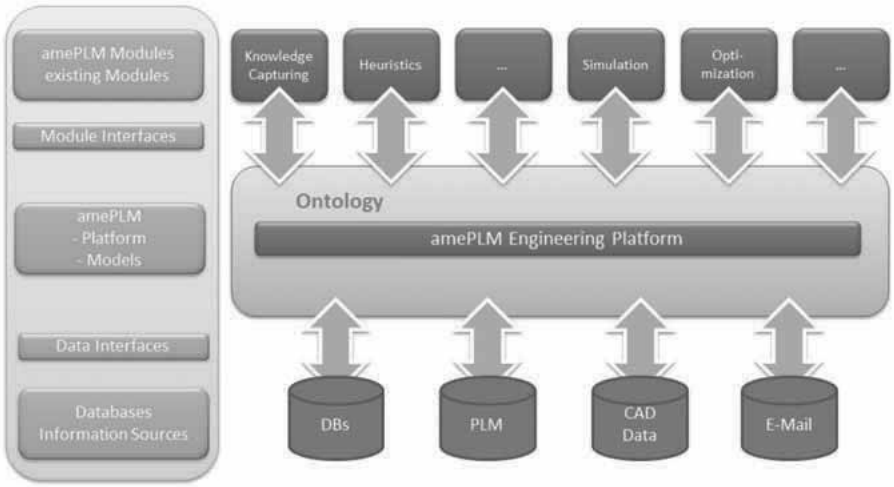


Abbildung 1: *Grobarchitektur der amePLM-Lösung*

3 Entwicklung hybrider Produkte

Um der zunehmenden Bedeutung des Dienstleistungsanteils an Produkten gerecht zu werden, kann dessen Entwicklung systematisiert werden. Die systematisierte Dienstleistungsentwicklung kann dann an die integrierte Produkt- und Produktionsentstehung gekoppelt werden.

Zur Systematisierung der Dienstleistungsentwicklung ist es zielführend, die Entwicklungsprozesse zu beschreiben und einzelne Entwicklungsschritte bis zu einem gewissen Grad zu standardisieren. Diese Formalisierung reicht von fest vorgegebenen Entwicklungsprozessen auf der einen Seite bis hin zu flexiblen Vorgehensweisen auf der anderen Seite. Ein einfacher Entwicklungsprozess wird im Folgenden vorgestellt, der die Entwicklung neuer Dienstleistungen von der Ideenfindung bis zur Markteinführung beschreibt. Es handelt sich dabei um ein Phasenmodell, das durch die lineare Abfolge der einzelnen nacheinander auszuführenden Prozessschritte gekennzeichnet ist. Abbildung 2 zeigt das insgesamt sechsphasige Modell im Überblick.

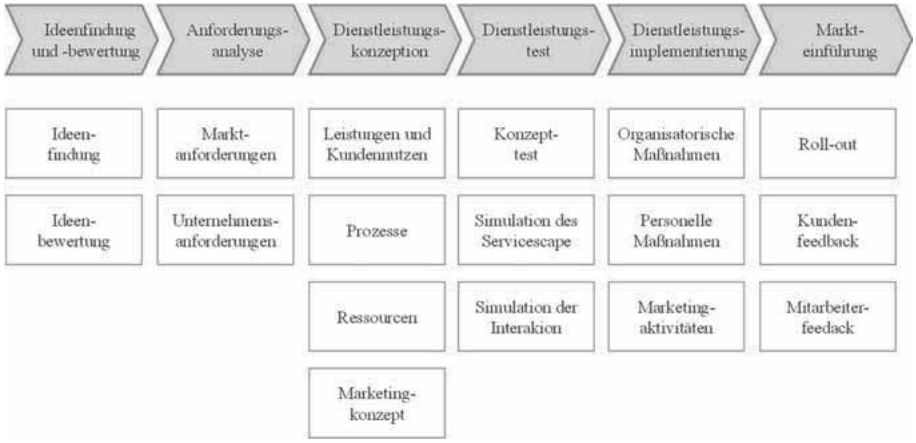


Abbildung 2: *Dienstleistungsentwicklungsprozess mit Aktivitäten*

Eine Alternative zum Testen von Dienstleistungen bietet die Visualisierung und Simulation von Dienstleistungen unter „Laborbedingungen". Hierzu wurde am Fraunhofer IAO in Stuttgart mit dem ServLab eine Plattform geschaffen, die es ermöglicht,

- Dienstleistungsprozesse interaktiv und intuitiv zu modellieren und zu simulieren,
- Dienstleistungsumgebungen, sogenannte „Servicesscapes", in einer virtuellen Realität oder in webbasierten 3D-Umgebungen zu gestalten sowie
- Interaktionen durch reale Akteure wie bspw. Kunden, Mitarbeiter oder Schauspieler, aber auch durch Avatare mit Techniken des „Service Theater" zu gestalten und optimieren zu lassen.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Funktionsbereiche des ServLab am Fraunhofer IAO in Stuttgart.

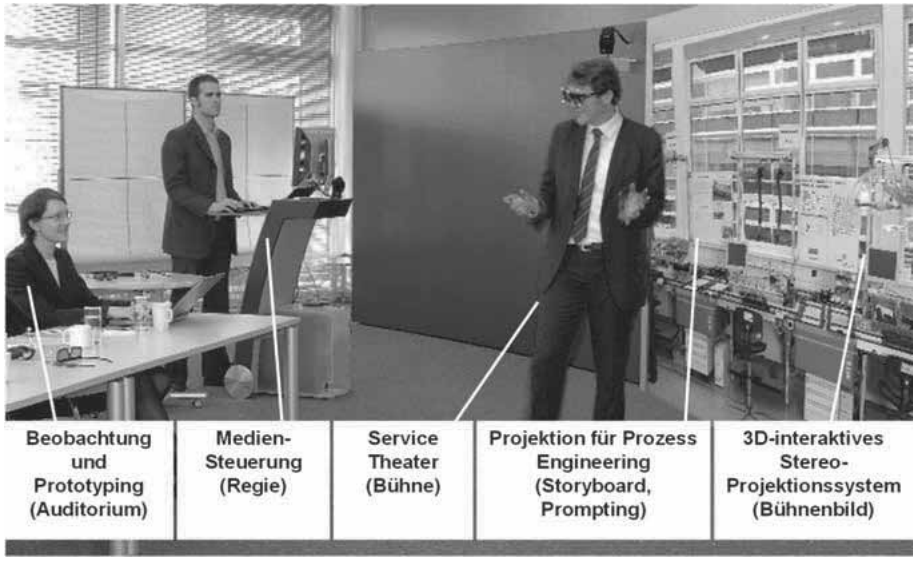


Abbildung 3: *Funktionsbereiche des ServLab am Fraunhofer IAO*

Die organisatorische Kopplung der integrierten Produkt- und Produktionsentwicklung mit der Dienstleistungsentwicklung kann außer mit den bekannten Ansätzen aus den Concurrent/Simultaneous Engineering-Bestrebungen sowie den Stage-Gate-Modellen auch mit feingranular definierten Referenzpunkten als Synchronisationspunkten erfolgen. Die Referenzpunkte (Abb. 4) sind in der Teilprozessstruktur für die gesamte Entwicklungsaufgabe verankert und können auch zur Ergänzung weiterer Ansätze eingesetzt werden. Sie fokussieren die „horizontale" Kommunikation zwischen parallel laufenden Teilprozessen und werden zu Projektbeginn inhaltlich und organisatorisch definiert. Durch den Einsatz von Synchronisationspunkten entsteht ein fein abgestuftes Reifegradmodell für die Entwicklung. Schwierigkeiten oder Versäumnisse können dadurch schneller erkannt und ihre Auswirkungen begrenzt oder beseitigt werden. Ein weitergehender Ansatz kann in der Bildung von permanenten Prozessteams liegen, in denen unterschiedliche Entwicklungskompetenzen zusammengefasst werden.

Abbildung 4: *Referenzpunkt-Ansatz*

Neben der organisatorischen Kopplung der Entwicklung von Produkt, Produktion und Dienstleistung sollte auch eine technische Vernetzung erfolgen, in der IT-Systeme oder Labore der beteiligten Disziplinen miteinander verknüpft werden, so dass durchgehende Informationsflüsse oder gar ein disziplinübergreifendes Collaborative Engineering ermöglicht werden.

4 Virtual Engineering im Haus der Wissensarbeit

Das neu eröffnete Zentrum für Virtuelles Engineering (ZVE) ist eine Forschungsplattform für die Entwicklung und Erprobung von Innovationen. In diesem „Haus der Wissensarbeit“ (Abb. 5) werden interdisziplinär die Grundlagen für wichtige Themen wie visuelle Technologien und softwaregestützte integrierte Produkt- und Produktionsentstehung erforscht. Es beherbergt dazu neben Büro- und Besprechungsbereichen folgende Labore:

- Digital Engineering Lab,
- 3D Interaction Lab,
- Immersive Engineering Lab,
- Light Fusion Lab,
- Mobility Innovation Lab,
- Workspace Innovation Lab und
- Urban Living Lab.

Abbildung 5: *Zentrum für Virtuelles Engineering des Fraunhofer IAO in Stuttgart*

Die Wissenschaftler im Digital Engineering Lab (DELab) bilden integrierte Prozessketten von der Idee bis zur Realisierung komplexer Produkte ab. Dazu wird anhand ausgewählter Beispiele untersucht und aufgezeigt, mit welchen innovativen Methoden und Werkzeugen Ingenieure in der Produkt- und Produktionsentwicklung noch effizienter qualitativ hochwertige Produkte und Systeme zeit- und kostengerecht entwickeln können und welche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Instrumenten entlang des Vorgehens zur Produktrealisierung bestehen.

Im Rahmen der integrierten virtuellen Produkt- und Produktionsentstehung im Digital Engineering Lab werden unter anderem Konzepte wie Digitale Produktion, Digitale Fabrik und Collaborative Engineering dargestellt. Besondere Berücksichtigung findet dabei die Verbindung von realer und digitaler Welt, also von Produkt und Produktionssystem mit ihren Repräsentationen in Softwarewerkzeugen. Adressiert wird dabei auch Rapid Prototyping bzw. Rapid Production, mit dem durch 3D-Druckverfahren die Vor-Ort-Produktion ganz nah am Kunden ermöglicht wird. Ein Ansatz, der bei Forschungsarbeiten im DELab verfolgt wird ist das „Serious Gaming im Engineering“; spielerische Elemente werden nicht nur für die Vermittlung, sondern auch für die Weiterentwicklung der Inhalte des Digital Engineering von Produkten und Produktionssystemen genutzt.

Im IELab, dem Labor für immersives Engineering im ZVE, werden insbesondere Anwendungsfälle der Produktentwicklung mit virtuellen Methoden, der Integration von Produktentwicklung und Produktionsplanung sowie aus Architektur und Bauplanung untersucht. Hauptbestandteil des Labors ist ein hochauflösendes 3D-Projektionssystem mit einer 5,5 m langen und 3,4 m hohen Powerwall sowie einer integrierten 4-Wand-Cave. Über eine Steuerzentrale - die zugleich auch als Besprechungsmöglichkeit dient - lassen sich unterschiedlichste Medienströme

verarbeiten. Die Interaktion erfolgt über aktuelle Techniken wie MultitouchDisplays, Gestensteuerung und 3D-Echtzeitpositionssysteme. Auch die Beleuchtung kann als integraler Bestandteil der Gesamtumgebung situationsangepasst mitgesteuert werden, was einen ganzheitlichen, ergonomisch optimal angepassten Arbeitsraum ermöglicht.

Durch die integrierte Nutzung von ServLab, DELab und IELab können hybride Produkte samt ihrer Produktion geplant, simuliert, visualisiert und damit ganzheitlich optimiert werden.

5 Simulation und Visualisierung in der Morgenstadt

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt im ZVE ist das Thema „Stadt der Zukunft“. Im Rahmen der Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung nennt sich das Zukunftsprojekt „Die CO2-neutrale, energieeffiziente und klimaangepasste Stadt“. Die Fraunhofer-Gesellschaft hat dafür unter der Leitung des Fraunhofer IAO mit zahlreichen Instituten die „Morgenstadt“-Initiative ins Leben gerufen. In ersten Vorlaufprojekten wird aktuell ein Beitrag für das Erreichen der Vision nachhaltiger und lebenswerter Städte erarbeitet. Langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines offenen Systemforschungsansatzes gemeinsam mit weiteren Akteuren aus Industrie, Forschung, Kommunen und Gesellschaft für unterschiedliche Stadtsysteme und neue Konzepte für relevante Technologien, Prozesse und Wertschöpfungsmodelle.

Im Innovationsnetzwerk „Morgenstadt: City Insights“ haben sich z.B. 12 Fraunhofer-Institute zusammengeschlossen, um zusammen mit namhaften Partnern aus der Industrie und der deutschen Städte-Landschaft systematische Einblicke in erfolgskritische Schnittstellen auf dem Weg zur ressourceneffizienten, intelligenten und nachhaltigen Stadt der Zukunft zu entwickeln. Inhaltlich fokussiert das Vorhaben auf die systemischen Wechselwirkungen von Technologien, Prozessen, Akteuren, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen in den relevanten Stadtsystemen Energie/Ressourcen, Mobilität/Logistik, Produktion/Logistik, Bauen/Gebäude, Information/Kommunikation, Sicherheit/Schutz und Governance/Organisation. Für derartige Fragestellungen sind Simulationen und Visualisierungen unerlässlich. Die Abbildung 6 zeigt hierzu ein Beispiel einer Visualisierung von Ideen in einer Stadt der Zukunft, wie sie für die „Morgenstadt“-Initiative realisiert wurde.

Abbildung 6: *Visualisierung zur Morgenstadt im ZVE des Fraunhofer IAO*

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dynamische Märkte und zunehmender Wettbewerb zwingen produzierende Unternehmen dazu, Zeiten bis zum Markteintritt neuer Produkte zu verkürzen und über Produkte Mehrwert beim Kunden zu schaffen, auch durch integrierte Angebote aus Produkten und Dienstleistungen, sogenannte Lösungen. Damit wird es nicht nur erforderlich, Produkt- und Produktionsentwicklung zu integrieren, um das Vorgehen von der Idee für ein Produkt bis zu seiner Produktion zu verkürzen. Zusätzlich muss häufig auch eine Dienstleistungskomponente des Lösungsangebots geschaffen werden. Diese Dienstleistung ist ebenfalls systematisch zu entwickeln und zwar in Abstimmung oder Integration zur Produkt- und Produktionsentwicklung.

Innovative informationstechnische Systeme ermöglichen eine neue Qualität der integrierten Entwicklung von Produkt, Produktion und Dienstleistungen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Simulation und Visualisierung, die Test und Optimierung der drei Komponenten präventiv erlauben. Für Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Kontext des resultierenden ganzheitlichen Digital Engineering wurde mit dem Zentrum für Virtuelles Engineering (ZVE) eine ideale Arbeitsumgebung geschaffen. Die im ZVE entwickelten und eingesetzten Methoden und Werkzeuge können auch zur ganzheitlichen Planung und Optimierung von Städten und Stadtvierteln im Sinne hochkomplexer, multidisziplinär entwickelter Produkte eingesetzt werden.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion

Industry 4.0 – Fields of Action of the Digital Factory to Optimize Resource Efficiency in Production Processes

Björn Krückhans, Horst Meier, Ruhr-Universität Bochum, Bochum (Germany),
krueckhans@lps.ruhr-uni-bochum.de, meier@lps.ruhr-uni-bochum.de

Abstract: This paper derives a framework for plants suitable for industry 4.0 to improve interoperable communications between virtual and real components. The need to optimize the automation pyramid is scientifically derived and described. New terms are delineated in the designed framework. Resource efficiency is anchored as an optimization objective in the framework. Different methods are shown to illustrate and describe consumption profiles. The focus of modeling is therefore not purely on the energy consumption, but on the entire consumption of resources. The described concepts will be validated in industry-related research and development project.

1 Einleitung

Das Thema „Industrie 4.0“ ist in aller Munde und wird im Rahmen der 2020 Strategie des BMBF als wesentliches Zukunftsprojekt gesehen. Insbesondere mit dem neuen Begriff „Cyber-Physical System“ (CPS) wird ein erhebliches Optimierungspotenzial zukünftiger ganzheitlicher Produktionsprozesse verknüpft und erwartet. Die eingebetteten Systeme sollen die „Smart Factory“ weiter vorantreiben und Produktionsstätten auf globaler Ebene vernetzen.

CPS umfassen „eingebettete Systeme, Logistik-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken […]“ (Geisberger und Broy 2012).

Die virtuellen Techniken der Digitalen Fabrik bieten in diesem Umfeld eine optimale Ergänzung, um vernetzte CPS mit zusätzlichen Erkenntnissen zu versorgen. Durch eine Online-Kopplung der verteilten interoperablen Systeme kann die bestehende Idee der Vernetzung der realen und virtuellen Fabrik weiter gedacht werden. Aufgrund des großen Fortschritts im Bereich der industriellen Kommunikation sind die angestrebten Ziele - im Gegensatz zu CIM - greifbar, meint ebenfalls Roland Bent. „CIM ist damals gescheitert, weil wir die Komplexität der Systeme nicht handeln konnten“ (Roland

Bent, Geschäftsführer Phoenix Contact; in Hensel 2012).Bisherige Konzepte der Automatisierungspyramide müssen im Zuge der vierten industriellen Revolution neu durchdacht werden, meint ebenfalls Olaf Sauer. „Die Automatisierungspyramide, wie wir sie bisher kennen, wird sich in absehbarer Zeit auflösen." (Olaf Sauer, Fraunhofer IOSB; in Hensel 2012)

Die Digitale Fabrik wird sich als ein wesentlicher Innovationstreiber in diesem Umfeld mit den neuen Möglichkeiten integrieren müssen. Trotzdem stellt sich die Frage, wie der praktische Nutzen einer großen Anzahl an kommunizierenden autonomen Systemen aussieht und welches Einsatzpotenzial erwartet wird? Insbesondere mit dem identifizierten produktionstechnischen Megatrend „Ressourceneffizienz" (Abele und Reinhart 2011) werden große Erwartungen an die zukünftige Produktion am Standort Deutschland verknüpft.

Der folgende Beitrag leitet, aufgrund des Wandels durch Industrie 4.0, ein neues Framework für die industrielle Kommunikation her, sodass die Digitale Fabrik weiterhin das Bindeglied zwischen realer und virtueller Produktion bleibt.

2 Stand der Technik

2.1 Informationsarchitektur in Produktionsunternehmen

Bestehende Ansätze zeigen, dass es beispielhafte Entwürfe gibt, die Alternativen zur klassischen Automatisierungspyramide bieten. Abbildung 1 grenzt z.B. Planungs- und Steuerungsapplikationen von dem Produktionsprozess, diversen Feldgeräten und Steuerungskomponenten ab. Beide basieren auf einem einheitlichen Informationsmodell (Vogel-Heuser et al. 2009). Die Abgrenzung zwischen virtueller und realer Welt ist somit gegeben. Die Basis bildet ein gemeinsames Informationsmodell. Das im Folgenden vorgestellte Framework soll weitere Möglichkeiten aufzeigen, um das Modell der klassischen Automatisierungspyramide neu zu überdenken und zu bewerten. Der Fokus liegt dabei auf der Bildung eines Frameworks zur Steigerung der Ressourceneffizienz von prozessorientierten Anlagen mithilfe eines neuartigen Simulationsansatzes.

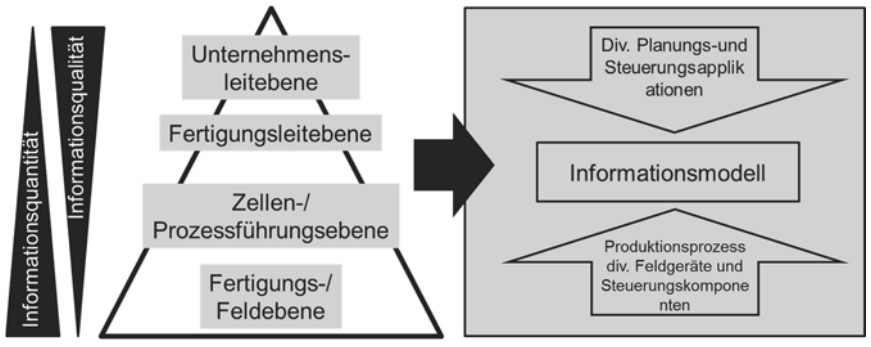


Abbildung 1: *Veränderung der Informationsarchitektur in Produktionsunternehmen nach Vogel-Heuser et al. (2009)*

2.2 Digitale Fabrik

Nach VDI 4499 wird die Digitale Fabrik als „Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u.a. der Simulation und 3D-Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ definiert.

Rechnergestützte Werkzeuge und Methoden ermöglichen es, Produkte und Prozesse virtuell in Modellen abzubilden, um die geplante Produktion numerisch zu optimieren und so einen fehlerfreien Betrieb zu erzeugen, der in die realen Fabrik übernommen werden kann. Hierdurch kann die reale Produktion laufend überwacht und verbessert werden. Die Digitale Fabrik ist ein integriertes, digitales Modell eines Produktionsunternehmens, womit auf Kundenanforderungen und Markteinflüsse schnellstmöglich reagiert werden kann und stellt ein Bindeglied zwischen realer und virtueller Produktion dar. (Hehenberger 2011)

Der Einbezug des Faktors „Energie“ ist mittlerweile in gängigen Materialflusssimulatoren implementiert (z.B. Plant Simulation 11). Dort können der statische Energieverbrauch in unterschiedlichen Betriebszuständen und die nötigen Übergangszeiten mit abgebildet und ausgewertet werden.

3 Handlungsbedarf

Hehenberger bezeichnet die Digitale Fabrik als Bindeglied zwischen realer und virtueller Produktion. Aufgrund der informationstechnischen Änderungen im realen Umfeld durch CPS, muss sich ebenfalls die virtuelle Welt anpassen.

Somit ergeben sich, durch die vierte industrielle Revolution, Chancen und Risiken für die reale und die virtuelle Fabrik.

Das Potenzial der Digitalen Fabrik und ihren Werkzeugen muss deutlich herausgearbeitet werden, sodass erkennbar wird, dass Simulationsanwendungen maßgebliche Werkzeuge zur Umsetzung der innovativen Ideen sind. Die Kommunikation der realen und virtuellen Welt wird auf eine neue interoperable Ebene gehoben werden müssen. Die Kombination von eingebetteten Systeme und der Digitalen Fabrik ermöglicht viele neue Denkansätze zur Überarbeitung der klassischen Automatisierungspyramide. Am Beispiel des Forschungs- und Entwicklungsprojekts rebas wird das Potenzial des neuartigen Simulationsgedanken theoretisch und praktisch am Beispiel einer prozessorientierten und diskreten Produktion offengelegt. Wesentlicher Schwerpunkt wird hier der produktionstechnische Megatrend „Ressourceneffizienz“ sein, da die alleinige Betrachtung des Themas „Energieeffizienz“ nicht mehr ausreichend ist und alle Stellhebel mit betrachtet werden müssen. Eine klar definierte Schnittstelle zwischen der realen Fabrik und dem digitalen Modell muss geschaffen werden (Abb. 2), die die klassische Verknüpfung von realer und virtueller Welt um den Ressourcenverbrauch erweitert bzw. näher spezifiziert. Dieses erweiterte Konzept muss zusätzlich in ein Framework eingebettet werden, sodass es in einer Industrie 4.0-tauglichen Produktionsumgebung integriert und bestehen kann.

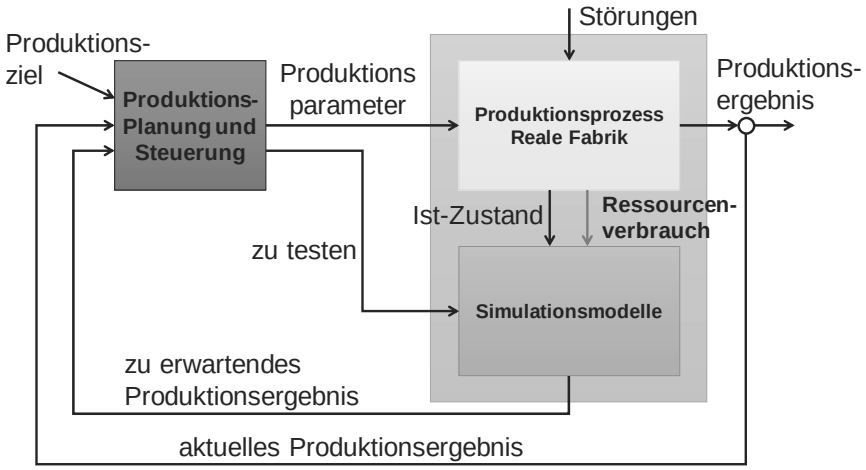


Abbildung 2: *Integration der Digitalen Fabrik nach Kühn (2006) mit einer erweiterten Datenbasis „Ressourcenverbrauch", die den Datenaustausch von Energie- und Materialverbräuchen zwischen der realen Fabrik und dem Simulationsmodell näher spezifiziert.*

Das im Folgenden vorgestellte Framework spiegelt ebenfalls die Visionen der Informationstechnik in der Fabrik der Zukunft wieder (Sauer 2013) und tangiert diese Megatrends mit innovativen Ansätzen.

4 Entwicklung eines Frameworks für interoperable Systeme zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion

4.1 Die Digitale Fabrik als Element der vierten industriellen Revolution

Elemente in einem Produktionsnetzwerk führen Stoff- und/ oder Informationsumwandlungen durch. Diese Elemente können virtuell oder real sein. Jeder virtuelle oder reale Netzwerkteilnehmer lässt sich abstrahiert darstellen (Abb. 3). Beide Typen sollen, durch die Bemühungen in der vierten industriellen Revolution, immer besser Zusammenarbeiten und kommunizieren können. Diese neuen Kommunikationsverbünde müssen jedoch geregelt und strukturiert werden, sodass eine belastbare Infrastruktur in einem interoperablen Umfeld entsteht.

Bevor die Produktion sich eigenständig optimieren und steuern kann, brauchen wir eine bessere Kopplung zwischen virtuellen und realen Elementen, bestätigt Dieter Wegener. „Wir brauchen zunächst das Zusammenwachsen der realen und virtuellen Welt – und das über den ganzen Produkt-Lebenszyklus vom Produkt-Design, über das Fabrik- und Anlagendesign, das Automatisierungsdesign, bis hin zur Produktion." (Prof. Dieter Wegener, Siemens; in Happacher 2013)

Das vorgestellte Framework (Abb. 3) geht neue Wege auf dem Gebiet der industriellen Kommunikation. Die beschriebenen Elemente im Produktionsnetzwerk

werden vorab, in Abhängigkeit der verfügbaren Umwandlungsfähigkeiten des Elementes, in drei Kategorien strukturiert angeordnet. Unterteilt werden virtuelle, hybride und reale Systeme. Virtuelle Elemente wandeln informationstechnische Signale um, wohingegen reale Elemente sich auf die Wandlung von Stoffen konzentrieren. Hybride Elemente bilden eine Brücke und können sowohl Informations- als auch Stoffumwandlungen durchführen.

Eine besondere Rolle bekommen zusätzlich noch Energieumwandlungsprozesse bei dieser Betrachtung. Diese werden übergeordnet bei allen Elementen betrachtet und mit ausgewertet, sodass das Ziel des ressourceneffizienten und interoperablen Produktionsverbundes gewährleistet werden kann.

Die Schnittstellen, an den Übergängen der Ebenen, werden hier als virtuelle und reale Ankopplung bezeichnet. Durch diese Ankopplung ist es möglich, dass alle Elemente auf eine definierte Weise miteinander verbunden sind und mit unterschiedlichen Zugriffsverfahren Einfluss im Verbund nehmen können.

Die Kommunikationsregeln werden hier durch Domänen vorgegeben. Eine Domäne bezeichnet hier eine Zusammenfassung von mehreren Elementen, die ein Wissens- oder Fachgebiet bündeln (ähnlich einer Abteilung). Standardisierte Kommunikationsregeln zwischen diesen Domänen sollten die Rechtevergabe im Verbund regeln. Als Ausnahme könnten zusätzliche „Domänenkopplungen“ dafür sorgen, dass Domänenübergreifend eine bessere Zusammenarbeit gewährleistet wird.

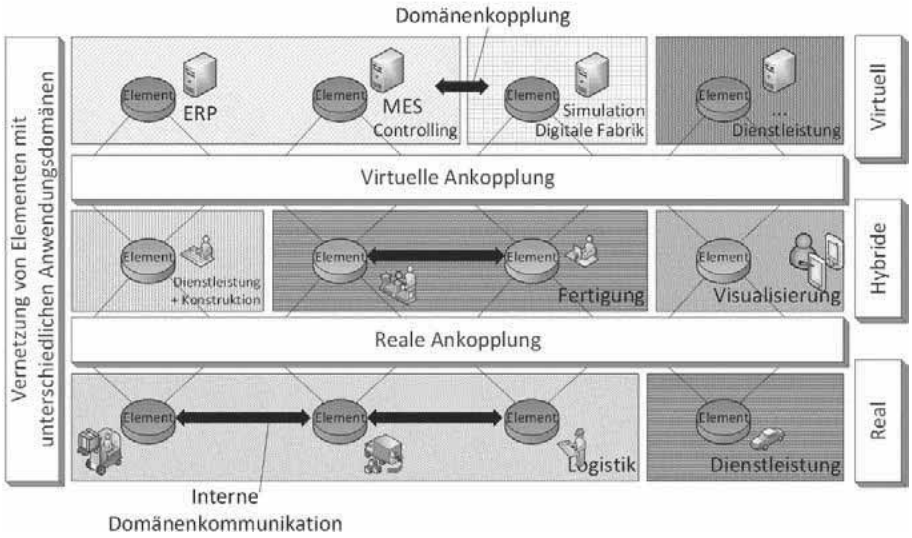


Abbildung 3: *Framework „Industrial Communication“ mit dem Schwerpunkt Ressourceneffizienz*

In Abbildung 3 ist z.B. eine Kopplung zwischen der Digitalen Fabrik und dem Controlling bzw. dem MES eingetragen. Diese soll signalisieren, dass eine enge informationstechnische Bindung zwischen diesen agentenähnlichen Elementen bestehen soll. Durch diese Maßnahme ist eine autonome, kognitive, kommunikative, proaktive, gesicherte und soziale Kommunikation möglich.

Insbesondere diese Kopplung und die Integration der Digitalen Fabrik als agentenähnliches Element, das im Produktionsverbund definierte Aufgaben autonom übernehmen kann, ist eine große Chance zur Integration verschiedener Simulationslösungen. Im Gegensatz zur bisherigen Integration (Abb. 2) sind die Erkenntnisse aus digitalen Modellen nicht mehr optionale parallel laufende Aktivitäten, sondern feste Bestandteile des Ganzen. Ebenfalls Gerd Hoppe ist der Meinung, dass wir mit Industrie 4.0 „[…] eine Verbindung zwischen den Methoden der virtuellen Welt, der Informationstechnologie und einem physischen System“ (Gerd Hoppe, Beckhoff Automation; in Hensel 2012) schaffen können.

4.2 Integration des Ressourcenverbrauchs realer Anlagen in die Digitale Fabrik

Als Basis wird ein Simulationsmodell für verkettete Anlagen entwickelt, in welchem anschließend die realen Anlagendaten mit den Auslegungsdaten des Herstellers validiert und verglichen werden. Mit Hilfe dieses Modells werden ressourcenoptimierte Regelkreise entworfen, die auf der vorhandenen Anlagentechnik basieren. Wie im Kapitel Handlungsbedarf gekennzeichnet, liegt der Fokus der Modellierung dabei nicht nur auf der Abbildung des Energieverbrauchs, sondern von *n* vielen Ressourcen.

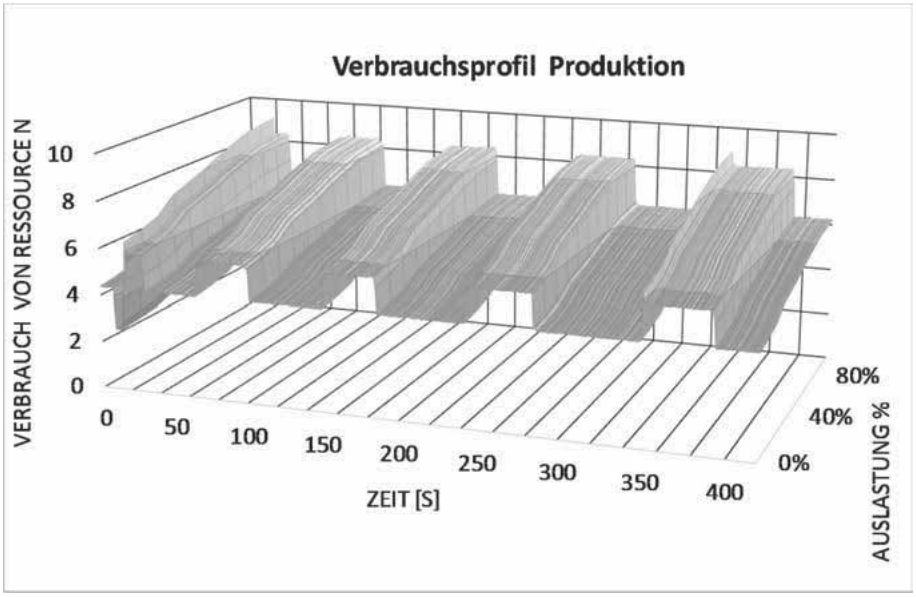


Abbildung 4: *Beispielhaftes Verbrauchsprofil einer Bearbeitungsstation im Produktionsnetzwerk. Die Profile werden zyklusbezogen in Abhängigkeit der prozentualen Auslastung, des Betriebszustandes und der betrachteten Ressource erstellt. Die Verknüpfung von unterschiedlichen Betriebszuständen wird über Transitionen realisiert.*

Als Grundvoraussetzung dient die zyklusbezogene Messung des Verbrauchsprofils in Abhängigkeit der prozentualen Auslastung, des Betriebszustandes und der betrachteten Ressource (Abb. 4).

Die Aufbereitung der Daten für die Abbildung im Simulationsmodell erfolgt anschließend in unterschiedlichen Granularitäten Je nach Anlagentyp müssen unterschiedliche Modelle verwendet werden, um eine bedarfsgerechte Auswertung durchführen zu können. Die wesentlichen Faktoren bei der Wahl des Abbildungsmodells sind die Zykluszeit der Bearbeitung und die anlagenspezifische Verkettung je nach Prozesstyp (Einzel- bis Massenfertigung). Die in Abbildung 5 dargestellte dreistufige Gliederung, bildet eine sinnvolle Einteilung, um simulationskonforme Daten zu erhalten.

In Funktion R_1 wird die Messung detailliert über den gesamten Zyklusverlaufs eines Bearbeitungsschrittes abgebildet. Bei langen Bearbeitungszyklen hat diese Variante den Vorteil, dass wesentlich genauere Aussagen hinsichtlich der Teilprozesse und Nebenaggregate getroffen werden können. In Abhängigkeit des verwendeten Messsystems wird die Auflösung der Messung verringert, sodass der Verbrauch über ein definiertes Zeitinkrement Δt angegeben wird. Der zeitliche Verlauf des Verbrauchs wird in Funktion R_3 nicht mehr berücksichtigt, sondern konstant über einen definierten Betrachtungszeitraum gemittelt und pro Zeiteinheit angegeben. Eine Aussage über mögliche Lastspitzen geht somit verloren. Der Verbrauch kann durch diese Vorgehensweise taktbezogen ermittelt werden, sodass Bearbeitungsmaschinen mit sehr geringen Zykluszeiten abgebildet werden können.

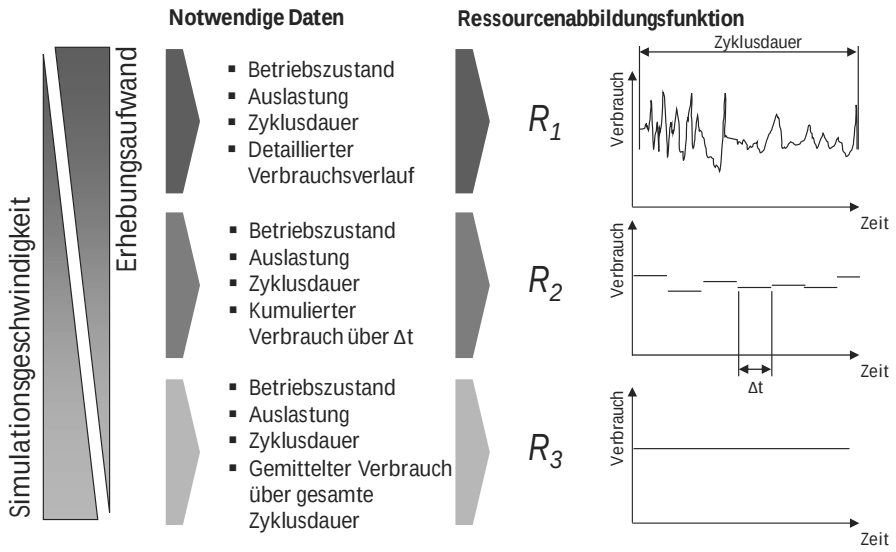


Abbildung 5: *Darstellung von notwendigen Daten zur Implementierung von drei verschiedenen Funktionen, zur Abbildung von Ressourcenverbräuchen in diskreten Simulationsmodellen. Simulationsgeschwindigkeit und Erhebungsaufwand sind gegenläufige Faktoren.*

Die Einbindung der Methoden erfolgt, nach Aufbereitung der Daten, über das parametrisierte Verbrauchsprofil anhand von abgeleiteten Funktionen oder Tabellen. Pro Betriebszustand liegt dem Simulanten ein Verbrauchskennfeld zur Abbildung vor.

Der Wechsel von Betriebszuständen erfolgt über Transitionsbeziehungen, sodass ebenfalls die zeitlichen und verbrauchsorientierten Änderungen mit in die Optimierung mit einbezogen werden können. Diese Verknüpfung führt dazu, dass sowohl die manuelle Auswertung des Simulanten oder die automatische Optimierung anhand programmierter Algorithmen erfolgen kann.

5 Aufbau von neuen interoperablen Konzepten zwischen der Digitalen Fabrik und Industrie 4.0

Unter dem Stichwort Retro-Fitting kann das Einsatzpotenzial einer modernen „Industrie 4.0–tauglichen-Anlagentechnik“ in Verbindung mit einer „Industrie 4.0–tauglichen–Digitalen Fabrik“ thematisiert und bewertet werden. Wie bereits als Handlungsbedarf gekennzeichnet, muss sich die digitale Fabrik an das veränderte Umfeld der realen Produktion (Industrie 4.0) anpassen. Industrie 4.0-taugliche Komponenten in der realen Produktion, können nach Integration in das Netzwerk eine vordefinierte Rolle einnehmen („Plug in & Produce“) und automatisch anfangen zu produzieren. Durch diese zukunftsweisende Betrachtung von Maschinen und Anlagen im realen Produktionsumfeld ergeben sich neue Anforderungen an die digitalen Komponenten: Simulationsanwendungen der Digitalen Fabrik sollten somit ebenfalls nach erfolgreicher Integration in ein solches System nach dem Prinzip „Plug in & Simulate“ arbeiten können.

Schnittstellenstandards wie OPC, u.Ä. sowie standardisierte Kommunikations-protokolle mit Manufacturing Execution Systemen (MES) sind in diesem Zusammenhang wichtige Grundlagen zur Umsetzung der Bestrebungen. Die bisherigen Standards der industriellen Kommunikation müssen dazu vereinheitlicht werden, um definierte Kommunikationskanäle zur Verfügung zu haben. Bei den zukünftigen Standards muss der immer wichtigere Faktor Ressourceneffizienz eine wesentliche Rolle spielen, sodass bereits wesentliche Daten über reservierte Datenbausteine/ Adressbereiche übertragen werden können.

6 Validierung

Im Rahmen des Projekts rebas werden seit 2012 Verfahren zur Senkung des Ressourcenverbrauchs verketteter Abfüllanlagen entwickelt und der erwähnte neuartige Simulationsansatz für neue und bestehende Anlagen industrienah entwickelt. Eine Abfüllanlage besteht aus einer Verkettung von unterschiedlichen Maschinen, die, je nach Alter, unterschiedliche Kommunikationsstrukturen und Protokolle aufweisen. Im Prozess werden die Kreisläufe Paletten-, Kisten- und Flaschentransport unterschieden und ausgewertet.

Als Ressourcen werden neben dem Energieverbrauch alle Stoffe betrachtet, die während des gesamten Prozessablaufes eingesetzt werden, in Form von Verpackungen, Hilfsstoffen und den Anlagenteilen selbst. Hinzu kommen Verluste beim abzufüllenden Medium.

Um das Gesamtziel zu erreichen, werden folgende Schritte im Projekt durchlaufen:

Zur Überwachung der aktuellen Verbräuche erfolgt die Konzeption und Integration geeigneter Messeinrichtungen und Auswertungsverfahren.

Die Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen an den Steuerungen werden so erweitert, dass die ressourcenrelevanten Informationen standardisiert zwischen allen Elementen im Netzwerk kommuniziert werden können. Eine Auswertung kann dezentral vom MES getroffen werden, welches auftragsrelevante Simulationsläufe mit Daten aus vergangenen Produktionen durchführen kann. Eine ressourcenorientierte Planung ist somit auf Basis eines MES möglich und zielführend. Zudem werden Kennzahlen ausgewählt, um Anlagenverhalten und -zustände detailliert abbilden zu können. Aus den konsolidierten Messdaten werden neuartige, ressourcenschonende Betriebspunkte für die Anlage abgeleitet. Dies erfolgt durch die Analyse der Wirkzusammenhänge der Einzelkomponenten sowie durch die Auswertung der Lastzustände und der Verbräuche.

Ergänzende Informationen werden bei dieser Analyse durch dezentrale Simulationsläufe erzeugt. Die Simulationsanwendung ist somit ein zusätzliches dezentrales Element im industriellen Kommunikationsnetzwerk. Anfragen von realen Steuerungen können agentenorientiert automatisch durchgeführt werden und Ergebnisse zurückmelden. Bei der Findung von ressourcenoptimalen Betriebszuständen liefern die virtuellen Modelle, durch ihre Vielzahl an Optimierungsalgorithmen und –möglichkeiten eine zuverlässige und detailliertere Aussage als ein MES. Zur Einordnung dieses Betriebspunktes zwischen den Zielgrößen Kosten, Qualität, Zeit und Ressourceneinsatz (Meier et al. 2012) werden im Simulationsmodell Variationen der Berg'schen Kurve / des V-Graphen erprobt und ausgewertet. Die entstandenen Vorgaben für den Anlagenbetrieb werden durch ein effizientes Anlagenlayout ergänzt, um Ressourcenverbräuche schon in der Entwicklungsphase beeinflussen zu können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vierte industrielle Revolution ist für den Standort Deutschland ein wichtiger Faktor, um nachhaltig wirtschaftlich produzieren zu können. Viele Betreiber Fragen sich, wie ein Industrie 4.0-konformes Retro-Fit einer bestehenden Anlagen aussieht und ob es sich lohnt? Der Megatrend „Ressourceneffizienz" muss in diesem neuen Konstrukt ebenfalls integriert werden, sodass durch interoperable Zusammenarbeit auf realer und virtueller Ebene verbrauchsarme Betriebspunkte gemeinsam anvisiert werden können. Das vorgestellte Framework definiert die nötigen automatisierungstechnischen Ebenen und Verknüpfungen. Die beschriebenen Anwendungsdomänen regeln die Rechtevergabe im gesamten Kommunikationsverbund, welcher aus realen und virtuellen Elementen besteht. Als Datenbasis für die virtuellen Elemente wurden unterschiedliche Verfahren vorgestellt, die dazu dienen, den anlagenbezogenen Verbrauch virtuell abzubilden. Im Forschungs- und Entwicklungsprojekt rebas werden die Konzepte industrienah validiert.

Allerdings ist es nicht für jeden Anwender sinnvoll, die komplette Produktion „Industrie 4.0-tauglich" aufzurüsten. Ein übergeordnetes Bewertungssystem wird in weiteren Forschungsarbeiten dazu dienen, die Wirtschaftlichkeit einer möglichen Umrüstung zu berechnen. Ein Industrie 4.0-konformes Retro-Fit konventioneller Anlagen erscheint kostspieliger als die Optimierung flexibler hochautomatisierter

Produktionsanlagen. Trotzdem muss das Bewertungssystem anlagenindividuelle Kommunikationsprotokolle und Standards berücksichtigen und Potenziale einschätzen.

Das, in Arbeit befindliche, endgültige Bewertungskonzept ermöglicht es, die neuen Denkansätze zur interoperablen Verbindung von virtuellen und realen „Industrie 4.0-tauglichen“ Komponenten gegenüber zu stellen.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts „rebas - Ressourceneffiziente Entwicklung und optimierter Betrieb von Abfüllanlagen in der Lebensmittelindustrie durch den Einsatz einer neuartigen Simulationssoftware“ innerhalb des Ziel2-Calls "Ressource.NRW", das vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz gefördert und von der Effizienz-Agentur NRW betreut wird.

Literatur

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.

Geisberger, E.; Broy, M.: agenda CPS - Integrierte Forschungsagenda - Cyber-Physical Systems. München, Berlin: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2012.

Happacher, M.: Industrie 4.0 - Wer verdient an der Fabrik der Zukunft. http://www.computer-automation.de/feldebene/vernetzung/fachwissen/article/95430/0/Wer_verdient_an_der_Fabrik_der_Zukunft/. VDI-Zukunftskongress 2013.

Hehenberger, P.: Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Hensel, R.: Industrie 4.0 revolutioniert die Produktion. Düsseldorf: VDI-Nachrichten 2012.

Kühn, W.: Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner. München: Carl Hanser Verlag 2006.

Meier, H.; Khalaf, S.; Krückhans, B.: Simulationsprozess für energieeffiziente Produktion. Marburg: IT & Production 2012, S.80-83.

Sauer, O.: Informationstechnik für die Fabrik der Zukunft. Berlin: Gito mbH Verlag 2013, S.11-14.

Vogel-Heuser, B.; Kegel, G.; Bender, K.; Wucherer, K: Global information architecture for industrial automation. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH 2009, S.108-115.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Digitale Klinikplanung – Reibungsloser Betrieb durch Simulation

Digital clinic planning – smooth business operation by simulation

Carsten Matysczok, Moritz Schele, UNITY AG, Büren (Germany),
carsten.matysczok@unity.de, moritz.schele@unity.de
Heike Wilson, DUALIS GmbH IT Solution, Dresden (Germany),
HWilson@dualis-it.de

Abstract: Currently clinics as well as doctors must provide more and more complex treatments profitable and in a constant quality. IT tools which are well established in manufacturing industries have the potential to cope with these challenges. The visualization of the planning is a success factor to reduce planning times, to use resources optimally and to support the decision making process (digital factory). Clinics can also use this knowhow to plan buildings and processes more efficiently. The main concepts and target of the digital factory can be applied 1:1 on the digital clinic. The target oriented clinic planning, the patient and OP simulation pick up this principle and transfer it to the clinical world. This paper describes two aspects of digital clinic planning: the optimization of clinic processes by OP simulation and the planning detailing as well as the preparation of the clinic staff by virtual commissioning. For the analysis of both topics dedicated simulation libraries and simulation models have been developed. Furthermore the simulation software Plant Simulation from Siemens PLM and 3DCreate from Visual Components have been extended.

1 Einleitung

Themen wie Logistik und Prozessoptimierung gehören zum Handwerkszeug eines jeden Unternehmensberaters. Das Einsatzgebiet beschränkte sich aber lange Zeit auf die Fertigungsindustrie. Seit Jahrzehnten vertrauen diese Unternehmen auf die Dienste von Beratern. Für Kliniken war es hingegen lange Zeit verpönt, Berater in das eigene Haus zu lassen. Der rationale, oft nüchterne Umgang, mit denen Berater Prozesse aufnehmen, analysieren und optimieren, wollte nicht so recht zur Versorgung von Patienten und zum Retten menschlichen Lebens passen. Doch diese Haltung änderte sich deutlich mit Einführung der DRG/Fallpauschalen und dem zunehmenden Wettbewerb der Kliniken untereinander (Pfänder undFischlein 2008).

Der Druck zum Handeln ist hoch: steigende Kosten und immer komplexere Organisationsabläufe stellen viele Kliniken vor große Herausforderungen. In der Vergangenheit haben bereits viele Kliniken mehr oder weniger erfolgreich Kosteneinsparungspotentiale erzielt, beispielsweise durch Personalreduktion oder Zusammenschluss in Einkaufsverbünden zur Senkung der Zukaufpreise (Ansorg et al. 2009). Darüber hinaus gibt es keine Patentlösung – zu unterschiedlich sind die Organisationsprozesse, zu speziell die Behandlungsabläufe. Individuelle, maßgeschneiderte Lösungen, die vor allem das operative Tagesgeschäft effizient gestalten, werden benötigt (Mühlbauer 2004). Was in der einen Klinik funktioniert, kann die aktuelle Situation in einer anderen sogar verschlechtern. Auch sind die Konsequenzen von Veränderungen nicht sofort ersichtlich.

Speziell der Methoden- und Wissenstransfer aus der mittlerweile hocheffizienten Fertigungsindustrie ermöglicht den Kliniken nun enorme Sprünge in den Bereichen Qualität und Produktivität (Gausemeier et al. 2009). Die Simulationstechnik hat sich zu einem wirksamen Beratungswerkzeug für die digitale Klinikplanung bei der UNITY entwickelt. Dieses belegen die Vielzahl und der Erfolg der bereits durchgeführten Projekte: So konnte z.B. durch gezielten Einsatz der Simulation Wechselzeiten im OP reduziert und die maximale Wartezeit auf 66% verringert werden. Auf diese Weise wurden Mehreinnahmen von rund neun Millionen Euro pro Jahr für die Klinik realisiert.

Der Beitrag beschreibt zwei Aspekte der digitalen Klinikplanung: die Optimierung von Klinikabläufen mittels OP-Simulation sowie die Planungsdetaillierung und Vorbereitung von Klinikmitarbeitern auf ihr zukünftiges Arbeitsumfeld durch die virtuelle Inbetriebnahme. Zur Analyse dieser beiden Fragestellungen wurden eine Reihe von Simulationsbibliotheken und Simulationsmodelle entwickelt sowie die Simulationssoftware *Plant Simulation* von *Siemens PLM* und *3DCreate* von *Visual Components* erweitert.

2 Optimierung der Klinikabläufe mittels OP-Simulation

Große Herausforderungen für die Kliniken sind aktuell die stark ansteigenden Kosten (Klauber et al. 2010) sowie die immer komplexeren Organisationsabläufe (Debatin et al. 2010). Die Lage verschärft sich zusätzlich, da es keine Patentlösung für alle Kliniken zu geben scheint. Die Organisationsprozesse sind zu unterschiedlich, die einzelnen Behandlungsabläufe zu speziell. Dieses trifft im Besonderen auf die Organisation und die Abläufe in den OPs zu.

Der OP-Bereich gehört zu den sensibelsten und komplexesten Arbeitsgebieten in einem Krankenhaus. Viele unterschiedliche Berufsgruppen treffen dort aufeinander – und damit auch viele unterschiedliche Wünsche und Bedürfnisse. Darüber hinaus gehören die operativen Eingriffe mit Abstand zu den teuersten Prozessen und Leistungen in einer Klinik (Welk und Bauer 2006) Bestmögliche Qualität für die Patienten, reibungslose Abläufe und effizienter Personal- und Materialeinsatz stehen ganz oben auf der Anforderungsliste.

Der OP-Bereich ist auch Motor eines jeden Krankenhauses. Hier zeigt sich, ob wirtschaftlich gearbeitet wird oder nicht. Die einfache Rechnung lautet: „Je mehr Operationen und Fallzahlen, desto höher sind die Einnahmen.“ Je enger aber die zeitliche Taktung, desto reibungsloser muss der Ablauf im OP erfolgen. Dieses stellt

die OP-Planer jeden Tag vor eine neue Herausforderung. Ziel muss also sein, die OP-Abläufe, Mitarbeitereinsätze und Räumlichkeiten bereits in der Planung optimal aufeinander abzustimmen. Die Prozesse werden geplant und optimiert, das Layout als unterstützende Struktur entwickelt und die Simulation liefert die Ergebnisse über die Leistungsfähigkeit (s. Abb. 1).

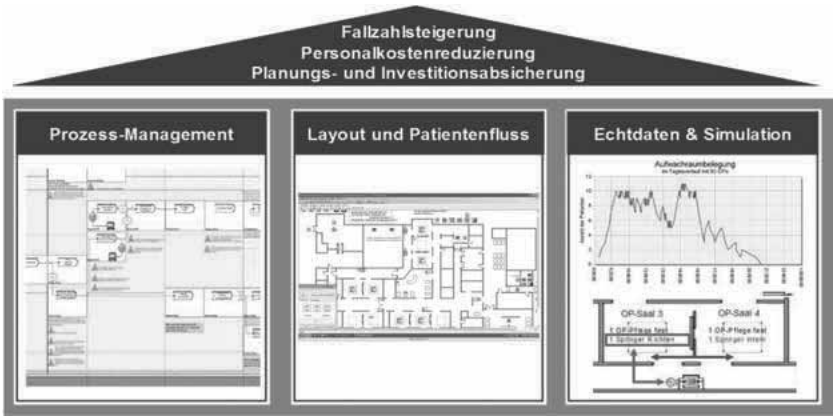


Abbildung 1: *Aspekte der digitalen Klinikplanung*

Besonders der OP-Betrieb mit seinen hochkomplexen Abläufen bietet noch sehr viel Potential. Wie können z.B. Kliniken ihre OP-Säle und -Ressourcen optimal auslasten? Und wie kann es gelingen, Wechselzeiten oder Verzögerungen beim Elektiv-Programm zu reduzieren? Das Erfolgsrezept heißt „digitale Simulation". Damit wird ein hohes Maß an Transparenz erreicht und die Basis zur Effizienzsteigerung der komplexen OP-Prozesse geschaffen. Die Fertigungsindustrie hat es vorgemacht: Sie nutzt die Simulation seit Jahren erfolgreich, um Personaleinsatz, Materialfluss und Organisationsstrukturen zu koordinieren.

Die Patientenfluss- und OP-Simulation der UNITY greifen dieses Prinzip auf und übertragen es auf die Klinikwelt (Matysczok 2012). Dafür werden sämtliche Schritte und die dafür benötigten Ressourcen der Klinikprozesse und beteiligten Akteuren aufgenommen. Dieses kann im Einzelfall vom Chirurgen mit seinem Skalpell über die Räumlichkeiten im Klinikum bis hin zu den Reinigungskräften und ihren Putzmitteln reichen. Im Simulationsmodell wird die „Digitale Klinik" abgebildet und verschiedene Parameter des Klinikmodells variiert. Mit wenigen Mausklicks können die Auswirkungen auf die Klinikabläufe neu berechnet werden, bis ein optimales Gesamtergebnis erreicht wird. Fragestellungen, die so beantwortet werden, sind beispielsweise: Wie wirkt es sich auf den OP-Tagesplan aus, wenn es schon bei der ersten OP zu Verzögerungen kommt? Was passiert, wenn weniger Personal zur Verfügung steht als ursprünglich eingeplant? Welche Auswirkung hat eine Verkürzung der Wechselzeiten um 30%? Über eine Vielzahl an Simulationsreihen entsteht schließlich ein Gesamtergebnis, bei dem alle Variablen optimal zusammenspielen und klare Kosten-/Nutzen-Aussagen geliefert werden können.

2.1 Modellaufbau und Datenbasis

Modellaufbau: Zum effizienten Modellaufbau wurde eine auf die Besonderheiten von Krankenhäusern angepasste Klassenbibliothek entwickelt. Diese umfasst Klassen wie beispielsweise den OP-Saal, die Patientenschleuse, den Aufwachraum, die zentrale Einleitung, die Intensivstation und viele mehr (s. Abb. 2). Je nach Anforderung und Untersuchungsziel können die entsprechenden Klassen genutzt werden, um ein auf den Kundenfall zugeschnittenes Simulationsmodell zu erstellen. Jede Klasse ist generisch aufgebaut und kann durch Parametrisierung an den Untersuchungsgegenstand und die Simulationsstudie angepasst werden.

Dabei sind innovative Konzepte aus der Klinikorganisation bereits integriert und können ohne Programmieraufwand an- bzw. abgeschaltet werden. Zu nennen sind die Zentralisierung der Anästhesieeinleitung (Narkoseeinleitung), das Rüsten der OP-Instrumente außerhalb des OP-Saals und die räumliche Kombination von OP-Vor- und –Nachbereitung (Patientenaustauschzone). Die Klassenbibliothek ermöglicht es dem Anwender, schnell und unkompliziert ein Simulationsmodell zu erstellen und durch Parametrisierung die verschiedenen Organisationskonzepte in Simulationsstudien miteinander zu vergleichen. Sind besondere Funktionalitäten gefragt, die in der entwickelten Klassenbibliothek nicht standardmäßig berücksichtigt sind, lassen sich diese in *Plant Simulation* erweitern und ebenfalls bewerten.

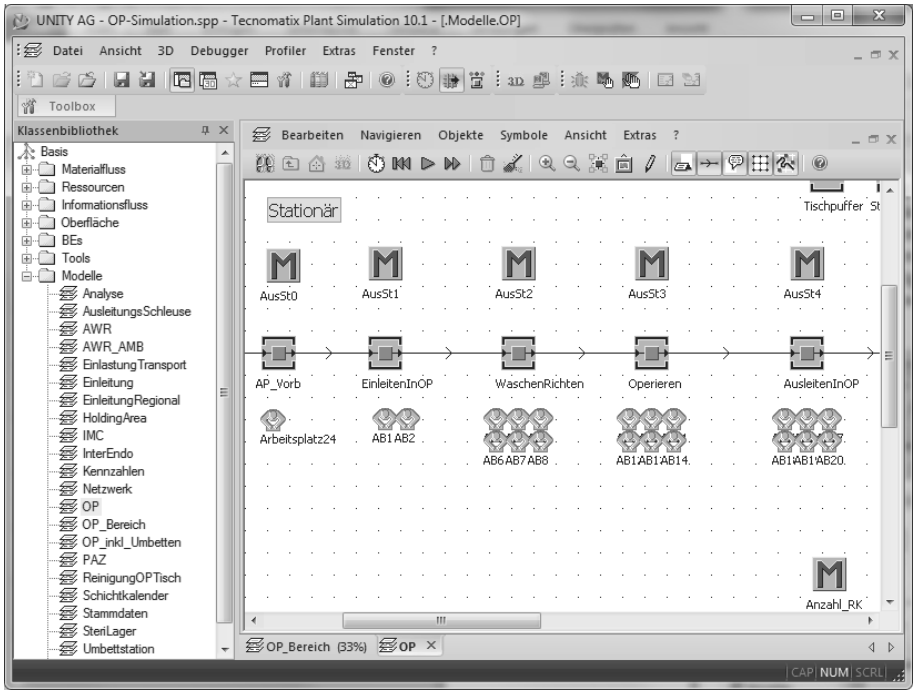


Abbildung 2: *Klassenbibliothek (links) und Aufbau der Klasse „OP-Saal“(rechts)*

Datenbasis: Die notwendigen Eingangsdaten zur OP-Simulation werden von jeder Klinik im Rahmen der §21-Daten und weiterer dokumentationsrelevanter Daten erhoben. Sie beschreiben die Anzahl und die Art der Operationen sowie den zeitlichen Verlauf einer jeden OP – von der Einschleusung über die anästhesiologische Vorbereitung und die eigentliche Operation bis hin zur Nachüberwachung des Patienten. Diese Daten werden bereinigt und ausgewertet und ein repräsentatives Fallspektrum für jede Fachabteilung wird erzeugt. Zusätzlich benötigt man Informationen über die Personalsituation und die Schichtpläne der Mitarbeiter (s. Abb. 3). Anhand dieser Echt-Daten wird das Simulationsmodell getestet und eingestellt, bis es zuverlässige und übertragbare Ergebnisse liefert. Zur Durchführung von Simulationsstudien werden diese Daten entsprechend der Medizinstrategie des Krankenhauses erweitert und bilden das zukünftige Fallspektrum und die geplanten Fallzahlen ab. Mit diesen Zahlen lässt sich die Leistungsfähigkeit des zu untersuchenden Bereiches für die Zukunft bewerten.

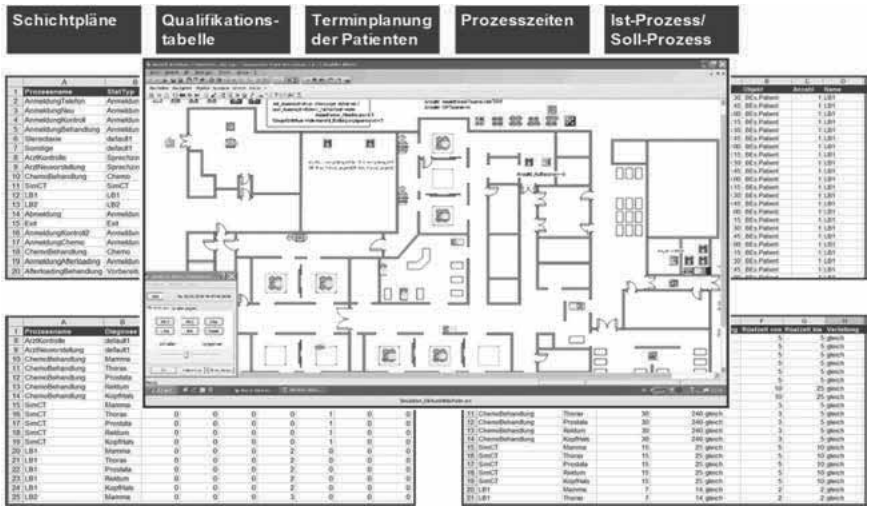


Abbildung 3: *Erforderliche Daten zur Durchführung der Simulation*

2.2 Anwendungsfälle

Reduzierung von Wechselzeiten: Die wichtigste Stellschraube für eine Optimierung der OP-Prozesse und dessen Auslastung ist die Wechselzeitreduzierung. Sinken die Wechselzeiten, können mehr Operationen in der gleichen Zeit durchgeführt werden, was wiederum Mehreinnahmen für die Klinik bedeutet. Der wichtigste Stellhebel zur Wechselzeitenreduzierung ist die Parallelisierung von Prozessen: die Anästhesieeinleitung eines Patienten während noch laufender Vorgänger-OP und ein externes Rüsten der OP-Instrumente außerhalb des OP-Saals sind vieldiskutierte Ansätze. Doch welchen Mehrwert haben diese Maßnahmen genau? Und sind sie im vorliegenden Fall aufgrund des höheren Ressourceneinsatzes auch wirklich Erlössteigernd?

Aufgrund des individuellen Fallspektrums jeder Klinik und der Wechselwirkungen zu anderen Prozessen lassen sich diese Aussagen nur durch die OP-Simulation

zuverlässig beantworten. Die verschiedenen Maßnahmen können simulativ abgebildet und untersucht werden, was zu Aussagen über deren konkreten Nutzen befähigt. Somit können unter Berücksichtigung der Raumstrukturen, des Fallspektrums, der OP-Zahlen und organisatorischer Gegebenheiten Aussagen über die Wirksamkeit von Prozessveränderungen zur Reduktion von Wechselzeiten getroffen werden (Abb. 4).

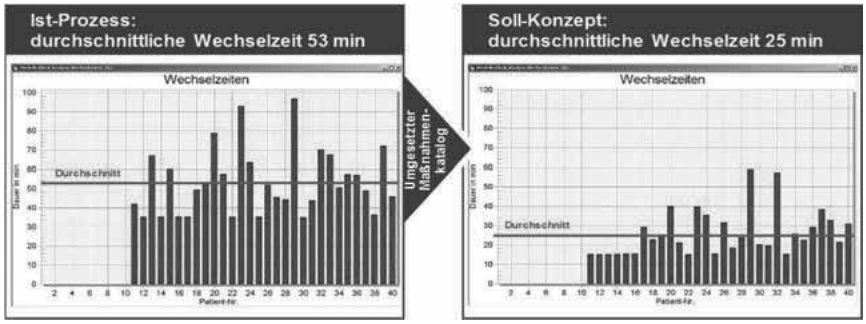


Abbildung 4: *Bewertung einer Prozessoptimierung zur Reduktion der Wechselzeiten um 66% (9 Mio. Mehrerlös pro Jahr)*

Dimensionierung der OP-, Ambulanz- und Bettenkapazitäten: Speziell bei Neu- und Umbauten von Krankenhäusern stellt sich die Frage nach der Kapazität der OP-Säle, des Aufwachraums oder ganzer Ambulanzzentren. Lassen sich die geplanten Fallzahlen in den zukünftigen Räumlichkeiten ableisten, oder beinhaltet die Planung Engpässe? Neben den räumlichen Gegebenheiten lässt sich auch der Ressourceneinsatz mit unterschiedlichen OP-Öffnungszeiten und Zuständigkeiten bewerten. So können verschiedene Einstellungen mit unterschiedlicher Anzahl der OP-Säle, angepassten Öffnungszeiten und Schichtmodell oder variierender Größe des Aufwachraumes miteinander verglichen werden, um das optimale Betriebskonzept für den vorliegenden Fall zu ermitteln werden (vgl. Abb. 5).

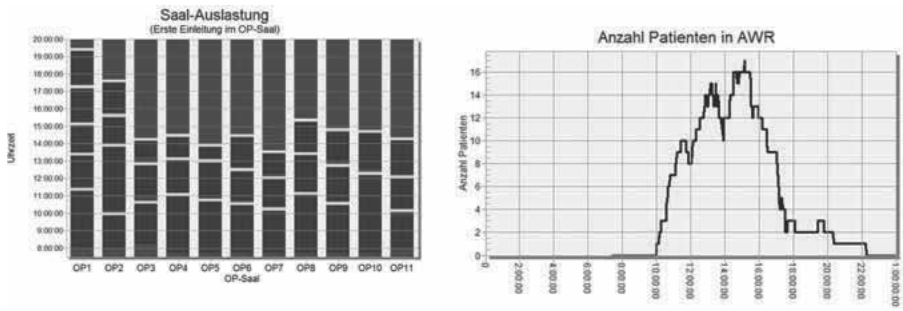


Abbildung 5: *Dimensionierung des Aufwachraums (Reduktion von 18 geplanten Plätzen auf 16)*

Auch die Kombination verschiedener Funktionen mit unterschiedlichen Nutzungszeiten ist möglich. So wurde im Simulationsmodell ermittelt, wie viele

Betten eine Kombination aus OP-Aufwachraum und anästhesiologischer Vorbereitung fassen muss. Da diese Funktionen zu unterschiedlichen Zeiten verschieden stark nachgefragt werden (Anästhesievorbereitung großer OPs vermehrt morgens, Aufwachraum verstärkt ab dem späten Vormittag), konnte so ein optimal dimensionierter Kombinationsraum geschaffen.

Planung des idealen Baukörpers: Um ein innovatives Gebäude zu schaffen, welches die Prozesse im gesamten Krankenhaus optimal unterstützt, ist auch eine innovative Vorgehensweise erforderlich. Mit einer digitalen Simulation des Neubaus können Kosten gespart und effiziente Abläufe unterstützt werden. Diese Simulation berücksichtigt neben den künftigen Klinikprozessen auch die topografischen Gegebenheiten inkl. der Bestandsgebäude und der Art des Neubaus. Bei der Betrachtung stellen sich u.a. folgende Fragen: Wie durchläuft ein Patient die Versorgungskette im Krankenhaus? Wie soll das Krankenhaus vor diesem Hintergrund optimal funktionieren? Wie müssen Stationen und Abteilungen infrastrukturell angeordnet sein, um möglichst effizient zu arbeiten? Wie können Pateienten- und Logistikwege optimiert werden? Alle erhobenen Daten werden in einer digitalen Simulation auf ihre Wirtschaftlichkeit und Realisierbarkeit hin überprüft. Hierdurch kann mittels klarer Kosten/Nutzenaussagen eine Grundlage für die Umsetzung geschaffen werden. Dieses erfolgt zusammen mit dem Architekten und dem hausinternen Projektteam. In der Simulation werden planerische Aspekte abgebildet, in unterschiedlichen Varianten zusammengefasst und bewertet. Diese sind u.a.:

- Schaffung einer zentralen Ambulanz mit gleichzeitiger administrativer, medizinischer und pflegerischer Aufnahme in einem Raum
- Kopplung der Notfallambulanz an den Wartebereich der Aufnahme zur Trennung mobiler und liegender Notfallpatienten
- Anordnung der Stationen nach dem angloamerikanischen Vorbild (Stationsbelegung richtet sich nach dem Schweregrad der Erkrankung des Patienten)
- Platzierung der Überwachungsstation in der unmittelbaren Nähe zum Katheterlabors und der diagnostischen Abteilung (fungiert nachts als Aufnahmestation für Notfallpatienten und tagsüber als Überwachungsbereich)
- Einrichtung von Poolarbeitsplätzen für eine effiziente Raumnutzung und Förderung der Kommunikation

Diese exemplarischen Aspekte, die bei einem Neubau beachtet werden müssen, verdeutlichen, dass es einen idealen Baukörper nicht geben kann: Je nach Leistungsspektrum des Krankenhauses bestehen auch bei den Fachabteilungen unterschiedliche Synergien und Beziehungen, die bei einer optimalen Anordnung der Ebenen und Räume berücksichtigt werden müssen. Nur eine individuelle Planung ist hier erfolgversprechend und zielführend. Das Ergebnis einer solchen gemeinsamen Planung und einer digitalen Simulation ist die optimale Anordnung der Stationen und Funktionsabteilungen, um kurze Wege und effiziente Arbeits- bzw. Behandlungsabläufe zu schaffen (vgl. Abb. 6).

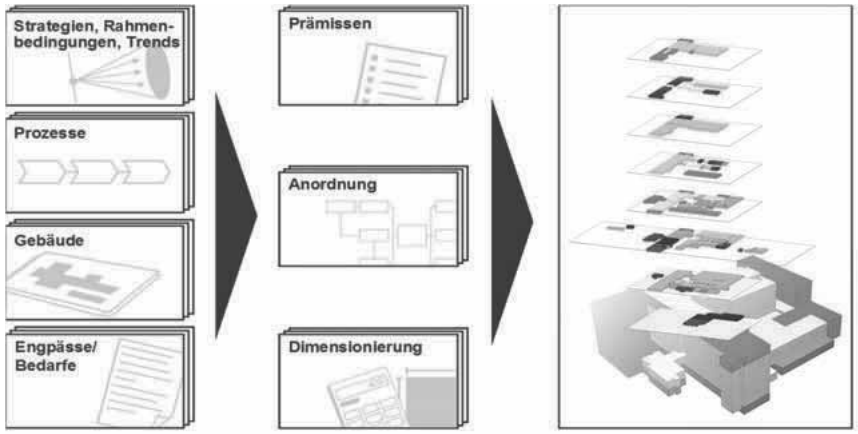


Abbildung 6: *Vorgehen zur optimalen Anordnung und Dimensionierung der Fachabteilungen*

3 Planungsdetaillierung durch virtuelle Inbetriebnahme

Die Planung von Prozessen und Gebäudestrukturen sollte Hand in Hand geschehen (Nyhuis 2010). Abläufe bedingen unterstützender Strukturen, um reibungslos und effizient zu funktionieren. Bezogen auf die Anordnung und Dimensionierung von Stationen und Funktionsbereichen wird dies im Rahmen der OP-Simulation bereits berücksichtigt. Doch ist das Abstraktionslevel in dieser Planungsphase noch relativ hoch, mit dem Ziel, die Gesamtheit der Prozesse und deren Zusammenspiel untereinander zu beleuchten. Je weiter die Planung voranschreitet, desto mehr Detailkonzepte zu Abläufen, Raumfunktionen und –anordnungen existieren. Im dynamischen Verlauf einer Gebäude- oder Umbauplanung kommt es vor, dass der Planungsstand von Layout oder Prozessen geändert werden muss, was Auswirkungen auf die anderen Bereiche hat. Diese laufende Harmonisierung bringt einen hohen Abstimmungsaufwand der beteiligten Parteien mit sich. Es gilt, Prozessplaner und -anwender mit Layoutplanern, TGA-Planern und Architekten zu synchronisieren. Selbstverständlich unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, welche von Projekt- oder Klinikleitung vorgegeben werden. Bei der virtuellen Inbetriebnahme werden alle Planungsebenen in einem Modell vereint, so dass Prozesse, Layout, Gebäude, Ausstattung und Personal gemeinsam betrachtet werden können. Das Gebäude wird mitsamt der Inneneinrichtung in einem 3D Modell nachgebildet und die geplanten Abläufe von virtuellen Pflegern, Ärzten und weiterem Personal ausgeführt (Abb.7).

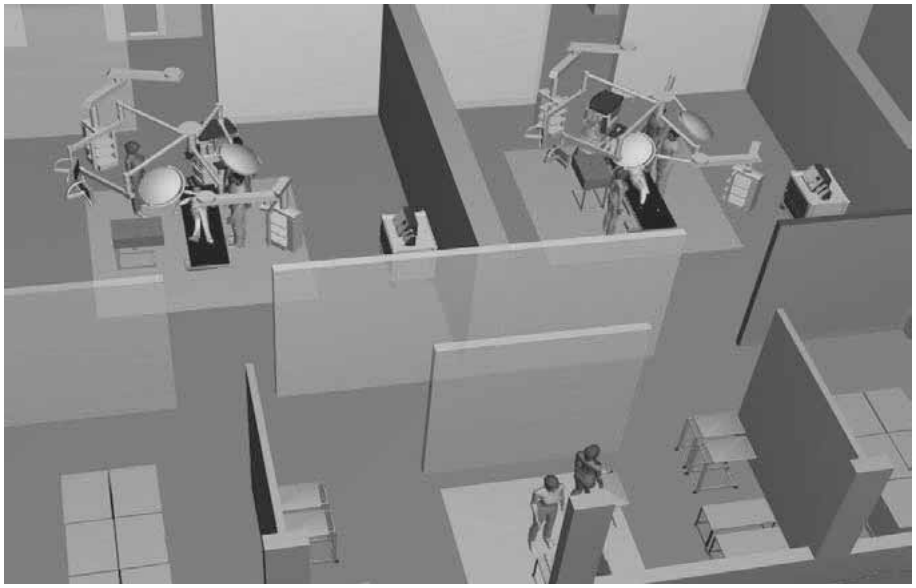


Abbildung 7: *Virtuelles Inbetriebnahmemodell*

Durch diese Verknüpfung von Prozessen und Gebäudeplanung und –ausstattung werden Planungslücken augenfällig und Abstimmungsbedarf wird erkannt. So konnte bei der virtuellen Inbetriebnahme der Sterilgutver- und -entsorgung das Fehlen eines Spülraumes für OP-Instrumente noch während der Planungsphase aufgedeckt werden.

3.1 Modellaufbau

Für die virtuelle Inbetriebnahme von Krankenhausprozessen kommt bei UNITY die Software *3DCreate* von *Visual Components* zum Einsatz. Diese Software erlaubt die Modellierung, Visualisierung und Simulation von Prozessen in 3D mit Werkersimulation und ist durch Programmierung in Python quasi beliebig erweiterbar.

Bei der Erstellung des Modells wird zu Beginn das Planungslayout in 3D CAD aufgebaut. Diese Daten werden in *3DCreate* importiert und stellen die Basis für die Prozessmodellierung dar. Um die Ausstattung des Krankenhauses abzubilden wurde eine 3D-Komponentenbibliothek erstellt, in der alle relevanten Geräte und Einrichtungsgegenstände eines OP-Bereichs enthalten sind. Diese beinhaltet beispielsweise Krankenhausbetten, OP-Tische, Anästhesiegeräte, OP-Ausstattung wie OP-Leuchten und -Ampeln sowie Transport- und Aufbewahrungsgeräte. Neben den statischen Geometrieinformationen sind auch Gelenke beschrieben, die eine Bewegung der Roboterarme während der Simulation ermöglicht. Dies ist erforderlich, um beispielsweise die Positionierung der Ampel- und Leuchtenarme bei Einfahrt in den OP-Saal zu bewerten. Auch die Personalressourcen wurden in der Bibliothek berücksichtigt und die Modelle beispielsweise mit der Funktion versehen, die Farbe der Kleidung zu wechseln. Dies ist erforderlich, um das Anziehen der sterilen OP-Kleidung für den Betrachter zu visualisieren. Diese

Komponenten lassen sich beliebig kombinieren und wiederverwenden und bei Bedarf anpassen.

Im nächsten Schritt wird der geplante Prozess modelliert und von den virtuellen Ärzten und Pflegern durchgeführt. Zur effizienten Modellierung der Werkertätigkeit kommen zwei Erweiterungen der DUALIS IT-Solutions GmbH zum Einsatz: der *SequenceScripter* und der *PoseRecorder*. Mit Hilfe des *SequenceScripters* lassen sich Python-Befehlsketten sequenziell ausführen und die Prozessbeschreibung somit effizient in Werkertätigkeit umsetzen. Diese oft benötigten Sequenzen sind beispielsweise das Ansteuern einer Wegmarke oder eines Objektes in der Simulation durch den Werker, Greif-, Hebe- und Transporttätigkeiten oder die logische Verknüpfung zu anderen Akteuren durch Setzen von Signalen. Der *PoseRecorder* dient zur Aufzeichnung von Körperbewegungen der Werker per inverser Kinematik. Die Bewegungsabläufe lassen sich speichern und als Sequenz vom *SequenceScripter* aufrufen. Dies dient zur Visualisierung von wiedererkennbaren Arbeitsabläufen bei der Arbeit in einer Klinik wie beispielsweise dem Anziehen von OP-Kleidung und Handschuhen, der chirurgische Handdesinfektion oder der Lagerung von Patienten. Diese beiden Hilfsmittel machen *3DCreate* zu einem leistungsfähigen Werkzeug zur Abbildung der menschlichen Arbeitsschritte in der Simulation. Je plastischer und detaillierter die Darstellung der Arbeitsabläufe, desto höher ist die Akzeptanz und das Verständnis der Prozesse bei den Mitarbeitern.

3.2 Detaillierung und Validierung der geplanten Prozesse und des zukünftigen Layouts

Bei der virtuellen Inbetriebnahme werden erstmalig die Prozesse mit dem geplanten Gebäudelayout und der zukünftigen Einrichtung verknüpft. Bereits bei der Modellierung ist ein Detaillierungsgrad erforderlich, der über die üblichen Prozessbeschreibungen hinausgeht. So wurde bei der Modellierung des externen Rüstprozesses in einer Klinik erkannt, dass der in Planung der Rüstzone (in der das sterile OP-Besteck vorbereitet und hergerichtet wird) eine adäquate Waschgelegenheit fehlt. Dies hätte zur Folge, dass durch das Sterilmachen und Händewaschen der Rüstkraft in den geplanten Nassräumen unnötig weite Mitarbeiterwege entstehen. Dieser Umstand wurde noch während der Planungsphase erkannt und konnte in der Wasserver- und –entsorgung berücksichtigt werden.

Die Raumausstattung, die Platzierung von OP-Gerätschaften und die Positionierung von Durchgängen und Türen können bei gleichzeitiger Betrachtung von Bau- und Prozessplanung wesentlich fundierter beurteilt werden. In einer weiteren Anwendung wurde festgestellt, dass ein Versatz von Ein- und Ausgangstüre in der Bettenschleuse erforderlich ist, um unnötige Bewegung der Patientenliege zu vermieden (aufgrund des Umbettvorganges und des damit verbunden Positionswechels des Patienten).

Aus der Ausstattungsplanung resultieren wiederum Anforderungen an die technische Gebäudeplanung: Wo sind Gas- und Luftanschlüsse ideal platziert und welche zusätzlichen Versorgungsleitungen sind gegebenenfalls erforderlich. Zudem wird die Planung von den späteren Anwendern selbst begutachtet und bewertet und nicht mehr nur von den jeweiligen Fachplanern. Dies führt zu einer gesteigerten Planungsqualität und breiteren Akzeptanz in der Belegschaft. Im Ablauf der Sterilgutver- und –entsorgung wurde so eine Planungslücke erkannt, die genau auf

die Schnittstelle zwischen zwei zuständigen Planungsinstanzen fällt. Zur Vorbereitung der externen Sterilgutaufbereitung ist ein Wasch- und Spülraum erforderlich, in dem die gebrauchten OP-Instrumente vorgereinigt werden. Dieser Schritt wurde weder im OP-Prozess, noch im Sterilgutversorgungskonzept berücksichtigt. Im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme wurde diese Planungslücke erkannt und konnte noch vor Baubeginn ausgebessert werden. Dadurch blieben der Klinik erhebliche Umbaukosten erspart. Nicht nur der zusätzliche Raum, sondern auch die Versorgung mit speziellem, elektrolytarmem Wasser hätten Kosten im sechsstelligen Eurobereich nach sich gezogen.

3.3 Visualisierung der Prozesse zur Mitarbeiterschulung

Die im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme abgesicherten und verfeinerten Prozesse und Räumlichkeiten stellen für das Personal ebenfalls neue Abläufe in neuen Strukturen dar. Ein weiterer Einsatzzweck ist daher Präsentation und Schulung dieser neuen Prozesse anhand des virtuellen Inbetriebnahmemodells. Die Mitarbeiter können sich sprichwörtlich selbst bei der Arbeit zusehen, und das noch bevor das Gebäude real existiert. Abläufe können erklärt, parallele Prozesse verdeutlicht und Schnittstellen visualisiert werden. Dieser Prozess des „Kennenlernens“ der neuen Arbeitsumgebung würde ohne die virtuelle Inbetriebnahme erst bei Betriebsbeginn im neuen Gebäude stattfinden, was Anlaufschwierigkeiten und erhöhte Aufwände bedeutete. Durch die Einbeziehung des Klinikpersonals werden Zweifel und Widerstände abgebaut und der reale Betriebsstart wird optimal vorbereitet. Eine detaillierte, lückenlose Planung und optimal vorbereitete Mitarbeiter ermöglichen einen reibungslosen Start im neuen Umfeld. Durch die verkürzte Anlaufphase und die konsequente Umsetzung der Sollprozesse von Beginn an werden Zeit und Kosten eingespart – bei gleichzeitig gestiegener Planungsqualität.

4 Zusammenfassung und Fazit

Kostendruck, sinkende Umsätze, fehlende Flexibilität – die Liste der Probleme in Kliniken ist lang und komplex. Immer mehr Kliniken holen sich daher externe Unterstützung von professionellen Unternehmensberatungen. Die UNITY setzt für eine Reihe von Fragestellungen die Simulation ein, die sich im Laufe der Zeit als ein mächtiges Werkzeug etabliert hat.

So können mittels OP-Simulation Klinikprozesse effizienter gestaltet und aufeinander abgestimmt werden. Das Ergebnis sind zufriedene Patienten und entlastete Mitarbeiter. Auch in punkto Effizienz können sich die Resultate sehen lassen, wie ein Praxisbeispiel verdeutlicht: Durch die von der UNITY entwickelte OP-Simulation kann das SRH Wald-Klinikum Gera mit gleichem Personaleinsatz 1.800 Operationen pro Jahr zusätzlich durchführen. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies einen Mehrerlös im oberen einstelligen Millionenbereich.

Bei allen Aktivitäten ist die kontinuierliche Einbeziehung der Klinikmitarbeiter für die UNITY ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Alle tangierten Abteilungen und Angestellten sind in allen Phasen des Projekts dabei – beginnend mit der Analysephase. Denn wenn sich OP-Schwestern, Narkoseärzte oder Chirurgen in

ihren spezifischen Arbeitsprozessen in der Bestandsaufnahme nicht wiederfinden, werden sie später auch die neue Lösung kaum akzeptieren.

Literatur

Ansorg, J.; Rabe, M.; Diemer, M.; Herberer, J.; von Eiff, W.: OP-Management. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft: 2009.

Debatin, J. F.; Ekkernkamp, A.; Schulte, B.: Krankenhausmanagement: Strategien, Konzepte, Methoden. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft: 2010.

Gausemeier, J.; Plass, C.; Wenzelmann, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG: 2009.

Klauber, J.; Geraedts, M.; Friedrich, J.: Krankenhausreport 2010. Schattauer GmbH: 2010.

Mühlbauer, B.: Prozessorganisation im DRG-geführten Krankenhaus. Wiley-VCH Verlag: 2004.

Matysczok, C.: Erfolgreiche Etablierung von Best Practices der Fabrikplanung im Klinikumfeld. In: Zülch, Gerd; Graichen, Stefan, Stock, Patricia (Hrsg.): Arbeitszeitgestaltung im Krankenhaus, 2012.

Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. GITO mbH Verlag, Berlin: 2010.

Pfänder, T.; Fischlein, J.: Industrielles Klinikmanagement. FinanzBuch Verlag: 2008.

Welk, I.; Bauer, M.: OP-Management: praktisch und effizient. Springer-Verlag GmbH: 2006.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik – Die neue VDI-Richtlinie 4499-4

Ergonomic representation of humans in the digital factory – The new guideline VDI 4499-4

Gert Zülch, Karlsruher Institut für Technologie,
Universitätsbereich, Karlsruhe (Germany),
gert.zuelch@gefora-beratung.de

Abstract: After several years of preparation by a VDI expert group from industry, software companies, consulting firms and science institutions, this year another part of the VDI guideline 4499 series "Digital factory" will be released. This part 4 of the guideline deals with the "Ergonomic representation of humans in the digital factory" and responds to a topic that often is called ergonomic simulation, although this term is not quite correct in principle. The expert group has devoted himself to the task not only to document the progress of science and technology in the ergonomic assessment using human models in the digital factory, while paying particular attention to the methods available in the German speaking countries. Beyond this, also the existence of deficiencies is highlighted and necessary further development fields are pointed out.

1 Entwicklungsstand und Gliederung des Richtlinienblattes VDI 4499-4

Mitte der 1980er-Jahre begann im Zuge des Fortschrittes der graphischen Datenverarbeitung die Entwicklung digitaler Menschmodelle (Mühlstedt et al. 2008). Sie stellen heute eines der wesentlichen Werkzeuge der Digitalen Fabrik dar. Die graphischen Darstellungen und die mit ihnen möglichen ergonomischen Bewertungen unterscheiden sich allerdings bei den verfügbaren Verfahren teilweise in erheblichem Maße. Nach mehr als 25 Jahren der Entwicklung digitaler Menschmodelle stellt sich somit die Frage, welches Menschmodell für bestimmte ergonomische Fragestellungen in Betracht kommt und welche Beschränkungen die Verfahren auch heute noch aufweisen.

Bereits seit zwölf Jahren besteht das Richtlinienblatt VDI 3633-6 "Abbildung des Personals in Simulationsmodellen" mit seiner längerfristigen Betrachtungsweise des Personaleinsatzes im Bereich von einer Schicht bis hin zu vielen Monaten. Der Fokus des neuen Richtlinienblattes liegt demgegenüber auf der dynamischen

Betrachtung von Arbeitsvorgängen im Sekunden- und Minutenbereich und auf der Bewertung statischer Arbeitssituationen.

Die Gesellschaft für Produktion und Logistik innerhalb des Vereins Deutscher Ingenieure, genauer gesagt deren Fachausschuss Digitale Fabrik innerhalb des Fachbereiches Fabrikplanung und -betrieb begann im Jahre 2008 mit der Veröffentlichung einer Richtlinienreihe zur digitalen Fabrikplanung. Der erste Teil dieser Richtlinie, VDI 4499 Blatt 1, befasst sich mit den Grundlagen der digitalen Fabrikplanung. Die weiteren Blätter dieser Richtlinienreihe werden spezielle Werkzeuge zum Gegenstand haben, so z. B. den digitalen Fabrikbetrieb.

Seit 2007 befasst sich ein Fachkreis des VDI mit der ergonomischen Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. Dieser Fachkreis setzt sich aus Vertretern der Wissenschaft und Softwarehäusern sowie aus industriellen Anwendern zusammen. Der so genannte Gründruck der Richtlinie erschien im Jahre 2012, sodass die endgültige Fassung zusammen mit einer englischen Übersetzung im Jahre 2013 als Weißdruck erscheinen kann.

Die Gliederung des Richtlinienblattes orientiert sich an den Teilgebieten der Technischen Mechanik, nämlich Geometrie, Kinematik, Statik und Dynamik. Während in ergonomischer Hinsicht die beiden erstgenannten Teilgebiete der anthroprometrischen Gestaltung zugerechnet werden, gehören die beiden zuletzt genannten zur arbeitsphysiologischen Gestaltung. Zu jedem dieser Teilgebiete werden im neuen Richtlinienblatt grundlegende Funktionalitäten aufgeführt, die ein digitales Menschmodell beinhalten sollte, sowie optionale, die zumindest in einigen der im deutschsprachigen Raum verfügbaren Werkzeuge vorhanden sind.

2 Funktionalitäten ergonomischer Menschmodelle

2.1 Geometrische Analyse

Bezogen auf die Geometrie eines Arbeitssystems unterscheidet das Richtlinienblatt in die Modellierung des Arbeitsplatzes bzw. des ggf. vereinfachten Arbeitsgegenstandes einerseits und in die des menschlichen Körpers andererseits. Hier zeigt sich, dass für ergonomische Fragestellungen viele Daten aus CAD-Modellen nicht relevant sind, beispielsweise Toleranzen und Kontaktflächen zwischen den innen liegenden Teilen eines vormontierten Arbeitsgegenstandes.

Der zweite Aspekt betrifft die Maße des menschlichen Körpers. Hierfür reichen vielfach die statistischen Perzentilwerte aus vorhandenen Normen- und Datensammlungen aus, die sich allerdings vorrangig auf den unbekleideten menschlichen Körper beziehen. Die zugehörige Bekleidung, insbesondere im Falle von Schutzbekleidung, ist weit weniger standardmäßig erfasst und bedeutet somit ein Problem bei der Überprüfung der Bewegungsmöglichkeiten des Menschen.

Eine weitere Problematik stellt die Variabilität des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Körperstellung dar. Normenmäßig erfasst sind dabei allenfalls die Hüft- bzw. Gesäßbreiten des menschlichen Körpers. Es ist zu erwarten, dass die inzwischen abgeschlossene Reihenuntersuchung im Projekt SizeGermany zu einer neuen Datengrundlage führen wird. Diese Untersuchungen sind zwar auf die Bekleidungsindustrie ausgerichtet, werden aber sicherlich auch Einfluss auf die Standardisierung von Körpermaßen in anderen Anwendungsbereichen haben.

2.2 Kinematische Analyse

Die kinematische Bewertung und Beurteilung bezieht sich einerseits auf die Bewegungsbereiche der menschlichen Gliedmaßen, andererseits auf den Zeitbedarf bei der Bewegungsdurchführung. Dabei bilden die Gelenke des Menschen und deren Beweglichkeiten eine spezielle Problematik. Hierbei handelt es sich vielfach um Relativbewegungen zwischen den Flächen von Gliedmaßen und Gleitkörpern sowie um Beziehungen zwischen den an einer Bewegung beteiligten Gliedmaßen. Ein Beispiel hierfür ist die Mitnahme der Schulter, wenn mit der Hand über dem Kopf gearbeitet wird. Diese Bewegungen können unter der Annahme starrer Gliedmaßen und scharnier- oder punktförmiger Gelenke mithilfe der Kinematik angenähert werden. Diese technischen Vereinfachungen führen dann zu gewissen Ungenauigkeiten in den Bewegungsbahnen und Reichweiten im Vergleich zu den realen Körperbewegungen.

Die Berechnung der Bewegungsbahnen kann mithilfe der Vorwärtskinematik bzw. der inversen Kinematik erfolgen. Zur Berechnung einer Bewegungsbahn von einem Ausgangs- zu einem Zielpunkt existieren verschiedene Ansätze, beispielsweise nach dem Prinzip der minimalen Auslenkung von Gliedmaßen ausgehend von einer komfortablen Winkelstellung der Gelenke.

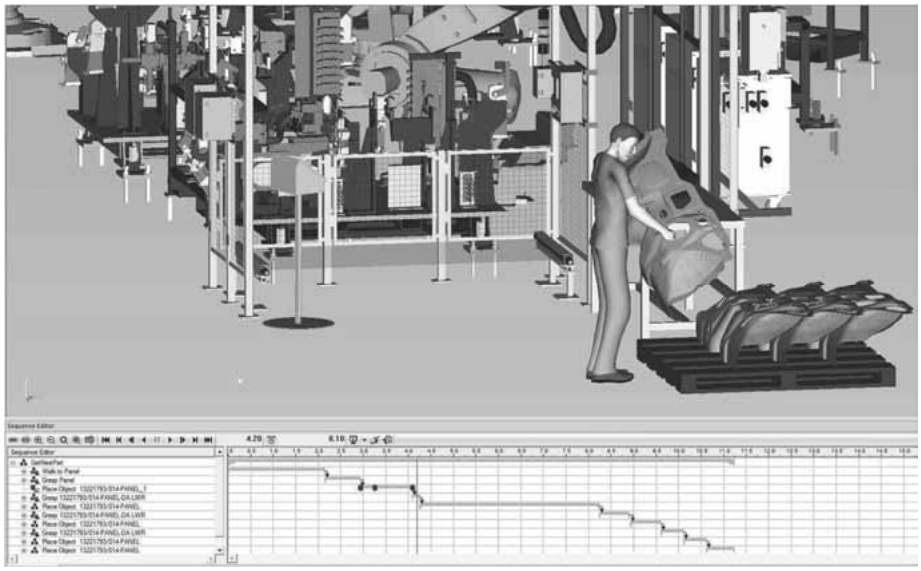


Abbildung 1: *Visualisierung und Zeitbanddarstellung eines Arbeitsvorgangs (Siemens PLM Software 2009; VDI 4499-4, S. 17).*

Ein weiteres Problem stellt die Geschwindigkeit dar, mit der Bewegungen des menschlichen Körpers ausgeführt werden. Stand der Technik ist hierbei, dass die hierzu erforderliche Zeitbewertung auf der Basis von Systemen vorbestimmter Zeiten oder auch auf der Basis von Planzeiten erfolgt. Abbildung 1 visualisiert einen Arbeitsvorgang zusammen mit der Zeitbanddarstellung der Arbeitsfolge.

Die Zeitbewertung mittels eines Systems vorbestimmter Zeiten kann jedoch nur eine Näherung sein, wenn z. B. Bewegungsbahnen Hindernisse aufweisen und Lasten bewegt werden müssen. So ist bekannt, dass für die Muskelbelastung (und damit letztlich auch der Zeitbedarf für die auszuführende Bewegung) nicht nur die horizontale Greifentfernung maßgebend ist, sondern auch die Winkelstellung sowie die Ausgangs- und Zielentfernung vom Körper. Durch Hinzunahme der vertikalen Auslenkung des Hand-Arm-Systems als dritte Dimension wird erwartungsgemäß der Zeitbedarf weiter modifiziert.

Die Bewegungsbahnen von Körperteilen des Menschen und die hierfür benötigten Zeiten werden üblicherweise durch motographische Aufnahmen realer Versuchspersonen erfasst. Für die Anwendung in menschmodellierenden Verfahren sind jedoch Algorithmen erforderlich, die in parametrisierter Form eine Berechnung der Bewegungsbahnen und der dafür benötigten Zeiten ermöglichen. Biomechanische Ansätze aus den Forschungsbereichen zur Entwicklung humanoider Roboter und der Sportwissenschaft zeigen hierzu einen Weg auf.

2.3 Statische Analyse

Bei der statischen Betrachtung unterliegt der menschliche Körper inneren oder äußeren Kräften bzw. Drehmomenten. Dabei wird in ergonomischer Hinsicht zwischen der Körperhaltung bei der Arbeit, also der Haltungsarbeit, und der isometrischen Haltearbeit unterschieden. Im Bedarfsfall ist dies weiter auf Hand-, Finger- und Fußkräfte sowie auf entsprechende Drehmomente zu spezialisieren.

Ein besonderes Problem stellen dabei Körperhaltungen dar, die durch die räumlichen Gegebenheiten in einer Arbeitssituation erzwungen werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich Körperteile an Gegenständen des Arbeitssystems abstützen. Zwar ist es prinzipiell möglich, die Gleichgewichtsbedingungen der dabei erzwungenen Körperhaltung zu berechnen, dies findet jedoch in den vorhandenen Verfahren nicht statt, vielmehr wird die Körperhaltung unter Berücksichtigung der geometrischen Eigenschaften des menschlichen Körpers quasi zeichnerisch dargestellt. Erst recht wird dabei die Verformung der Körperoberfläche nicht berücksichtigt.

Für die Analyse, Bewertung und Beurteilung menschlicher Haltungs- und Haltearbeit gibt es diverse Methoden, denen unterschiedliche kinematische Annahmen oder auch praxisorientierte Ansätze zugrunde liegen. Zu den Letzteren gehören die in Finnland entwickelte OWAS-Methode sowie die in Deutschland verbreitete Leitmerkmalmethode. Für diese Methode stehen im Internet Berechnungsformulare zur Verfügung.

Beide Methoden liefern – wenn auch in unterschiedlich detaillierter Form – eine Beurteilung statischer Arbeit und Hinweise auf die Notwendigkeit von Umgestaltungsmaßnahmen. Dabei wird auch die zeitliche Inanspruchnahme durch eine bestimmte Haltungs- oder Haltearbeit in Form von Häufigkeiten pro Schicht berücksichtigt; eine eigentliche dynamische Bewertung findet jedoch hierbei nicht statt, da die statische Arbeit nur zu einem bestimmten, dem Benutzer als kritisch bekannten Zeitpunkt analysiert wird.

Abbildung 2: *Darstellung und Bewertung der Körperhaltung bei einer Wartungsarbeit (Virtual Human Engineering 2011; VDI 4499-4, S. 19).*

Zu den kinematisch-statischen Methoden zählen z.B. die amerikanische Grenzlastmethode nach NIOSH und die englische RULA-Methode. Abbildung 2 zeigt als Beispiel einen bestimmten Zeitpunkt einer Haltungsarbeit und deren Bewertung nach dem NASA-Standard STD 3000 im Verfahren IDO:Ergonomics; die Beurteilung der prognostizierten Belastung einzelner Gliedmaßen ist anhand einer Ampelbeurteilung erkennbar. Die genannten Methoden berücksichtigen auch extern wirkende Kräfte und erlauben somit eine Bewertung sowohl von Haltungs- als auch von Haltearbeit.

Es zeigt sich, dass in den international vertriebenen menschmodellierenden Verfahren Bewertungsmethoden aus dem angloamerikanischen Raum dominieren, während in Deutschland entwickelte Verfahren vorrangig nicht in Standardverfahren zur digitalen Fabrikplanung eingebunden sind. So ist die in Deutschland seit Jahren bekannte VDI-Methode zur Bestimmung von Lastobergrenzen zwar als Rechenverfahren verfügbar, nicht aber als Werkzeug der Digitalen Fabrik. Anzumerken ist, dass die unterschiedlichen Verfahren zur Bewertung statischer Arbeit in Grenzfällen zu unterschiedlichen Beurteilungen von Arbeitsvorgängen führen (Zülch 2009, S. 114 f.).

2.4 Dynamische Analyse

Dynamische Aspekte werden bei der Modellierung des Menschen im Rahmen der digitalen Fabrikplanung üblicherweise dadurch abgebildet, dass die Frequenz oder die Dauer von Bewegungen unter Wirkung äußerer Kräfte und Drehmomente berücksichtigt wird. Durch Minderungsfaktoren werden die maximal möglichen Kräfte und Drehmomente aufgrund von Geschlecht, Alter, Trainiertheit und

Frequenz der Bewegungen reduziert. Dieses Prinzip wird beispielsweise in der Leitmerkmalmethode für das Heben und Tragen, das Schieben und Ziehen von Lasten sowie bei manuellen, repetitiven Arbeitsvorgängen verfolgt.

In weiteren Anwendungen wird der metabolische Arbeitsenergieumsatz aufgrund so genannter Systeme vorbestimmter Belastungen ermittelt. Derartige Ansätze reichen bis in die 1920er-Jahre zurück. Sie lassen sich mit Verfahren vorbestimmter Zeiten kombinieren und wie diese dann in Tabellenform aufbereiten. Die Energieumsatzberechnung nach Spitzer, Hettinger und Kaminski ist zum Beispiel im Verfahren EKIDES enthalten. Diese Methode ist aber nicht in den in Deutschland verwendeten Verfahren zur digitalen Fabrikplanung enthalten. Die amerikanischen Menschmodelle JACK und JILL beinhalten darüber hinaus auch eine prospektive Bewertung der menschlichen Ermüdung und Erholung nach den Formeln von Rohmert.

Demgegenüber sind Methoden zur Berechnung von Belastungen des Menschen unter Einwirkung äußerer Kräfte und Beschleunigungen ein weitgehend unbearbeitetes Feld im Rahmen der digitalen Fabrikplanung. Bereits aus den 1980er-Jahren sind zwar Anwendungen aus dem militärischen Bereich, insbesondere der Flugzeugführung, bekannt geworden, die dann im Rahmen der Fahrzeugentwicklung für Crash-Untersuchungen ihre Fortsetzung erfuhren. Ein weiterer Anwendungsbereich ist in der Sportwissenschaft zu finden; diesbezüglich kann beispielsweise auf das Verfahren alaska hingewiesen werden, das an der Technischen Universität Chemnitz entwickelt wurde.

Weitere Aspekte der Menschmodellierung werden gegenwärtig am Karlsruher Institut für Technologie im Zusammenhang mit der Entwicklung humanoider Roboter erarbeitet: Will man die Bewegungen von Robotern menschenähnlich gestalten, so ist zunächst eine Analyse der menschlichen Bewegungen erforderlich. Hierzu sind dann nicht nur die geometrischen Eigenschaften und Bewegungsbahnen des Menschen zu analysieren, sondern diese durch die Masse von Gliedmaßen und deren Trägheitseigenschaften zu ergänzen. Zielrichtung ist es dann, Bewegungsbahnen zu synthetisieren, also Bewegungen nach den Prinzipien der Vorwärtsdynamik oder auch der inversen Dynamik (analog zu Vorwärtskinematik und inversen Kinematik) zu berechnen. Nach welchen Prinzipien dann die Bewegungsbahnen generiert werden sollten, etwa basierend auf dem Prinzip des minimalen Drehmomentes, ist allerdings noch weitgehend unbekannt. Diese Ansätze bedürfen somit noch ihrer Validierung im Vergleich zu realen Bewegungsbahnen.

Dynamische Anwendungen aus dem Bereich der Fabrikplanung sind jedoch bislang nicht bekannt geworden. Beispielsweise ist zwar eine Bewertung der Wirbelsäulenbelastung beim Gehen auf Böden mit Federeigenschaften denkbar, aber noch nicht erprobt und erst recht nicht in Verfahren der Digitalen Fabrik integriert. Vergleichbare Anwendungen sind aus der Gestaltung von Kraftfahrzeugsitzen durchaus bekannt und bedürfen lediglich der Übertragung, um Arbeitsbelastungen oder auch Arbeitserleichterungen durch die Federeigenschaft einer Arbeitsplattform zu bewerten. Anatomische Menschmodelle, die über Gliedmaße und Gelenke hinaus auch die Wirkungsweise von Muskeln, Sehnen und Bändern berücksichtigen, zeigen einen Weg auf. Diesbezüglich sind vor allem die Arbeiten des MIRALab an der Universität Genf zu nennen.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft das dänische Menschmodell AnyBody beim Schieben eines Krankenbettes. Die resultierenden Kräfte am Ellenbogengelenk sind in Abhängigkeit von der Griffhöhe dargestellt.

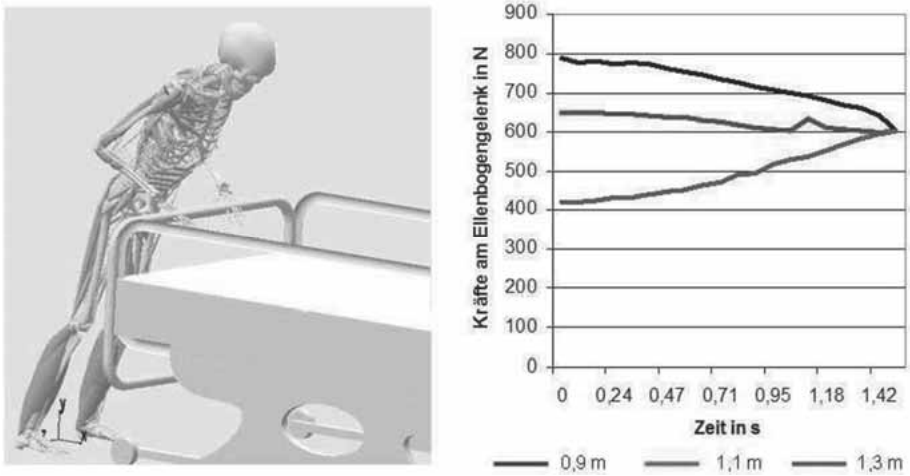


Abbildung 3: *Verlauf der Reaktionskraft am Ellenbogen in Abhängigkeit von der Griffhöhe (AnyBody Technology 2011; VDI 4499-4, S. 22).*

3 Notwendigkeit weiterer Entwicklungsarbeiten

Die Erörterung digitaler Menschmodelle im VDI-Fachkreis anhand der Teilgebiete der Technischen Mechanik führte nicht nur zu der Erkenntnis, welche Aspekte davon in verschiedenen Werkzeugen der Digitalen Fabrik bereits vorhanden sind, sondern auch darüber, welche Beschränkungen diese aufweisen. Während die anthroprometrische Gestaltung in weiten Bereichen als standardmäßig abgedeckt angesehen werden kann, eröffnet sich bei der arbeitsphysiologischen Gestaltung noch eine Reihe von Fragestellungen. Insbesondere fällt auf, dass Bewertungsmöglichkeiten aus dem deutschen Sprachraum in kommerziellen Werkzeugen kaum zu finden sind. Für die Anwendung in der betrieblichen Praxis erweist es sich darüber hinaus als besonders nachteilig, dass Bewertungsverfahren für ergonomisch gleichartige Arbeitsvorgänge zu teilweise sehr unterschiedlichen Beurteilungen führen. Weiterhin bestehen Defizite bezüglich der Analyse von Kollisionen zwischen Modellelementen; dies gilt sowohl für starre Körper, erst recht aber für flexible und deren Verformung infolge von Kollisionen.

Die hier vorgestellten Beispiele zeigen, dass die Modellierung des Menschen in Werkzeugen der Digitalen Fabrik noch bei Weitem nicht ausreicht, um ergonomische Bewertungen und Beurteilungen umfassend in erst virtuell vorhandenen Arbeitssystemen durchzuführen. Die im Sinne eines prospektiven Arbeits- und Gesundheitsschutzes zu fordernde Risikobewertung zukünftiger Arbeitssysteme wirft darüber hinaus noch eine Reihe methodischer Fragen auf. Dies betrifft insbesondere die Bewertung und Beurteilung sukzessiver Belastungsverläufe bei einer einzelnen Belastungsart und diejenige bei mehreren simultan wirkenden

Belastungsarten, beides Themen, die noch weitere ergonomische Grundlagenforschung erfordern.

Danksagung

In seiner Funktion als Koordinator der hier zusammenfassend dargestellten Arbeiten dankt der Autor allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des VDI-Fachkreises sowie allen Personen, insbesondere aus Softwarehäusern, die unterstützend dabei mitgewirkt haben.

Literatur

Ausführliche Literaturhinweise, insbesondere zu den genannten Methoden und Softwareverfahren, sind in der Richtlinie VDI 4499-4 zu finden. An dieser Stelle erfolgt lediglich eine Aufstellung der für diesen Beitrag wesentlichen Quellen.

AnyBody Technology (Hrsg.): Occupational Health. Aalborg: Anybody Technology A/S, 2011. http://www.anybodytech.com/index.php? id=166, Zugriff am 08.11.2011.

Mühlstedt, J.; Kaußler, H.; Spanner-Ulmer, B.: Programme in Menschgestalt: Digitale Menschmodelle für CAx- und PLM-Systeme. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 62 (2008) 2, S. 79-86.

Siemens PLM Software (Hrsg.): Jack and Process Simulate Human. http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/assembly_planning/jack/index.shtml, Zugriff am 25.05.2009.

VDI 3633 Blatt 6:2001-01: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Abbildung des Personals in Simulationsmodellen.

VDI 4499 Blatt 4, Entwurf:2012-04: Digitale Fabrik – Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik.

Virtual Human Engineering (Hrsg.): CharAT Ergonomics. Stuttgart: Virtual Human Engineering GmbH. http://www.virtualhumanengineering.com/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=16&lang=de, Zugriff am 31.01.2011.

Zülch, Gert: Perspektiven der Menschmodellierung als Werkzeug der digitalen Fabrikplanung. In: Schenk, Michael (Hrsg.): Digital Engineering – Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation. Berlin: GITO-Verlag, 2009, S. 105-124.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Mobile devices and applications for factory planning and operation

Mobile Anwendungen im Rahmen der Fabrikplanung und des Fabrikbetriebs

Uwe Bracht, Patrick Brosch, Anna-Charlotte Fleischmann, TU Clausthal,
Clausthal-Zellerfeld (Germany), uwe.bracht@imab.tu-clausthal.de,
patrick.brosch@imab.tu-clausthal.de, anna.c.fleischmann@imab.tu-clausthal.de

Abstract: Driven by current changes in the market and accelerated by the possibilities modern mobile devices offer to the planner, there is a necessity to organise production and planning processes more efficiently. This paper is going to highlight the deployment of mobile devices in the factory planning process based on the VDI guideline 5200 "factory planning". Furthermore, the VDI guideline 4499 is going to be taken into consideration concerning the possibility of changes in information technologies. It will discuss fields of application and identifies possible directions of development for future planning tools. In this context, the use of a quadrocopter to support the data acquisition is going to be explained. Additionally, the relation towards future simulation applications is given.

1 Introduction

In times of constant and fierce competition in a globalized world, it is of major importance to make operating and planning data available beyond the daily work environment (Bracht 2002, Schenk 2009). In addition, there is the need for tools to improve the daily work of engineers (Westkämper 2012). In this context, the Digital Factory undertakes the task, to enable companies to withstand the high pressure of competition in the market by providing information like plant and process layout (Bracht and Masurat 2005, Bracht et al. 2011).

A major aim of the Digital Factory is to provide the user with non-redundant and user-specific data which is both, current and consistent (VDI 4499, part 1, Reichert 2009). In this regard, the utilization of mobile devices offers a vast potential. Due to the usage of mobile devices it is possible to receive information at a corresponding location (Amberg and Lang 2011). Furthermore, a fast data exchange is allowed which simplifies communication during the planning period. Additionally, it is possible to evaluate and to add specific information to the simulation of different scenarios already on the plant field. In the future, it will be possible to carry out

simulation processes and to access the results on-site by the use of mobile devices and cloud services. This makes it much easier to get the right information and impression during the planning process (Spillner 2011).

Based on both, a research of available mobile applications on the consumer and business market on the one hand, and a functional analysis of mobile devices on the other hand, this paper points out new possible applications for the Digital Factory. The interaction between features such as camera, GPS and motion detection leads to new and unknown opportunities. In this context, self-developed applications will be taken into consideration. These applications will be evaluated by practical examples.

Actual examinations at the IMAB were focused on apps, which originate from known system suppliers and also show potential for the use in the factory planning process. The potential has been constituted by the support and simplification of general planning tasks of the factory planner. Figure 1 gives a classified overview of existing applications, which includes benefits for the planner during the factory planning process.

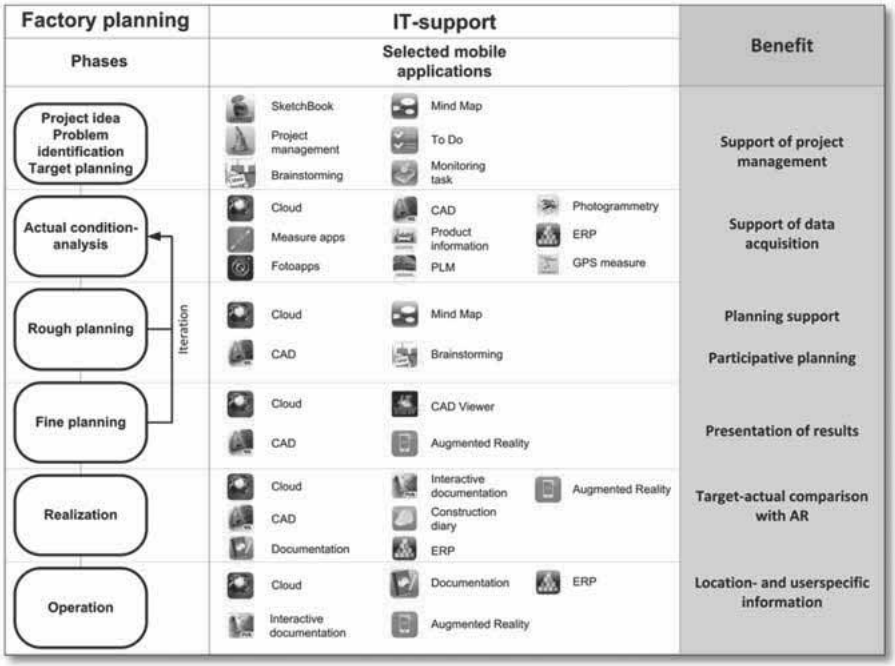


Figure 1: *Classified overview of existing applications for the factory planning process*

As a result, there are mainly applications, which can be quickly integrated into existing processes and which are able to generate benefits. These advantages consist primarily of saved time, support of a consistent data management, a targeted and appropriate user support as well as modularity.

By combining the hardware features, it is possible to obtain completely new functionalities for areas like planning, manufacturing or servicing and maintenance requirements (Yüzgülec et al. 2013). Due to the fact, that it is now possible to link the camera with positioning functions and the internet, the user is able to send pictures with specific information like the actual location. Furthermore, the usage of interactive installation or servicing apps makes it possible to facilitate the work and therefore to reduce mistakes.

Augmented Reality is a new derivative of the Virtual Reality Technology which enables the user to experience the real and the virtual world simultaneously. Due to this fact, the level of immersion increases which facilitates the recognition of divergences. Possible fields of application are construction sites or the logistics sector, in order to minimize the time that is spend on searching for components or goods (Schreiber and Zimmermann 2011).

2 State of the art

There are many different mobile devices of various manufacturers on the market available. According to a survey of Bitkom, one in eight users in Germany use mobile devices (Bitkom 2012).These include devices like smartphones, Tablet-PCs and netbooks, which all combine a low weight on the one hand, and handy dimensions on the other hand. Therefore, they are very suitable for mobile usage (Fig. 2).

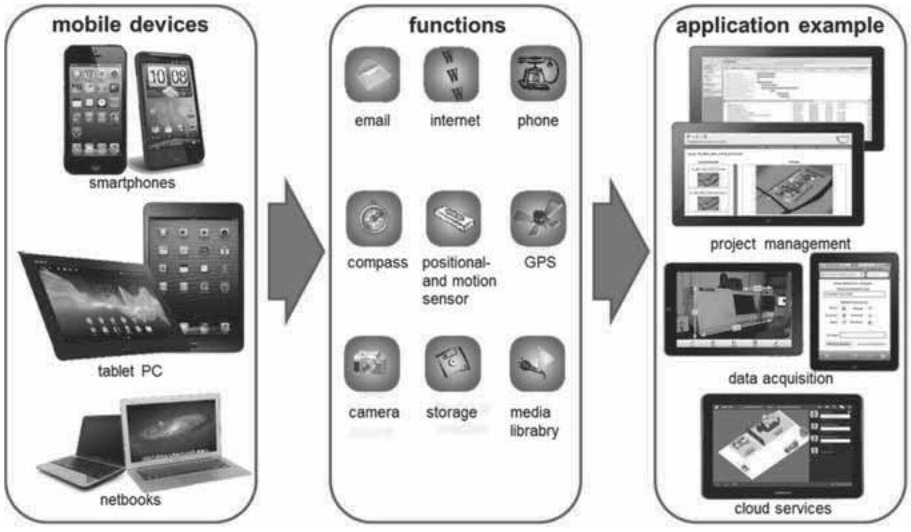


Figure 2: *Functionalities and fields of application of mobile devices*

As a result of the focus on highest possible portability, the devices distinguish themselves only by technical means. Tablet-PCs and smartphones combine various functionalities, whose diversity could yet only be reached through the usage of separate hardware. Most devices possess high-definition cameras, as well as a variety of office applications. Beyond that they offer different possibilities of

communication like phone, email, internet or videotelephony (Maske 2012). Caused by the rapid development of mobile devices in the last couple of years, the hardware offers a high computing power, which makes their usage within the factory planning possible. As an example, data can be gathered with the integrated camera and can be forwarded to fellow workers. Furthermore, it is possible to process the data by using special programs.

Mobile devices accomplish a growing importance on the industrial field. Especially the digital factory sector identified the usage of such communication devices and deployed them respectively. Mobile devices support the factory planning already significantly. There are still a couple of situations in the factory planning process, where the integration of this hardware is desired. This fact is going to be described in the following.

Factory planning serves the deployment of necessary data and information. Following the VDI guideline 5200, the factory planning process consists of seven different phases, which enable a successful execution. It starts with the setting of objectives. In this phase, the project objectives have to be described and work packages have to be specified. The second phase contains the establishment of the project basis, which consists of the procurement and the evaluation of information. The concept planning is made up of the structure planning, ideal planning and the following real planning. This includes the definition of concepts, which merge within the fourth phase into the so-called detailed planning. Subsequently the preparation of specifications of services is drawn up, which leads to the user requirements and the functional specifications. During the following preparation for realization the offer procurement and the awarding of contracts take place. Aside from that, the implementation planning leads the project to a starting point. Phase six regards the monitoring realization, which addresses the coordination, monitoring and documentation of realization. The last stage covers the ramp-up support. This phase supports the attainment of previously within the factory objectives declared levels of performance. The level of attainment is as a result expressed through the factory evaluation.

The factory planning process, as outlined before, contains a vast potential through the integration of mobile devices. This does not only result in a more mobile and adjustable availability of data, but also lead to a usage of all the available functionalities of such a device. The deployment of mobile devices has increased rapidly throughout the last few years, which is specifically caused by the possibility to be able to gather and forward information from any location. Besides known possibilities of communication such as phone, internet and email, the user is now able to locate, process and convey his or her position through the use of GPS. Furthermore, the user can take pictures of different objects, which can be altered, named, scaled and forwarded (as mentioned in chapter 3). Especially the conjunction of these particular functions enables the user to exploit the whole potential of smartphones and tablet PC´s. Mobile devices gain more and more acceptance and are expected to be increasingly integrated within the factory planning process.

The following section shall highlight the possibilities mobile applications could, and partly already do provide to the factory planning process.

3 Employment of mobile devices in the digital factory

After taking place in the consumer sector, mobile devices take on greater significance in the industrial world. The following figure 3 shows, how mobile devices support the digital factory within the factory planning.

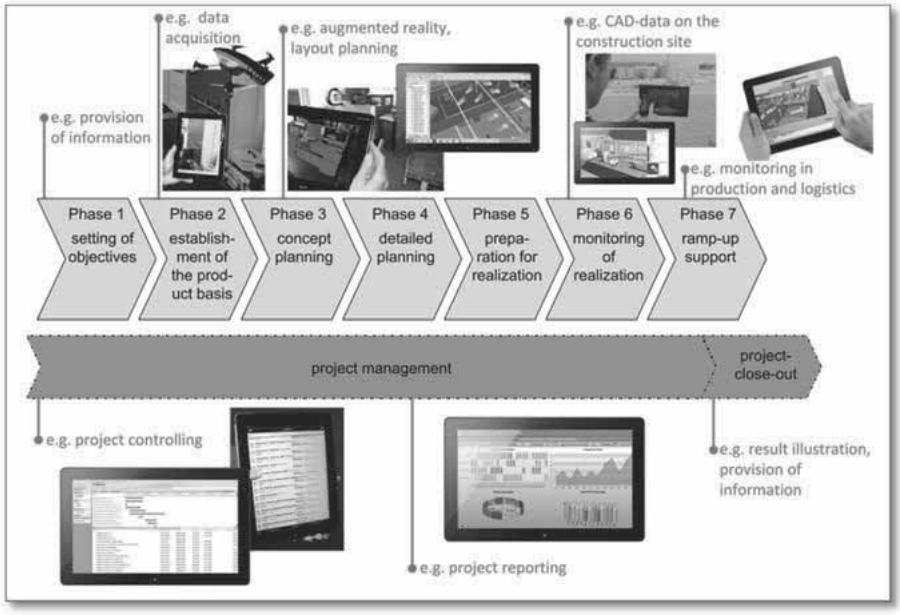


Figure 3: *Employment of mobile devices throughout the factory planning process*

There are various mobile applications, which can be used during the different stages of the factory planning process. In the project management field, which covers the entire process, there are numerous applications that can be used to keep all team members up to date concerning all project-related information. Furthermore, it is possible to use these applications to observe milestones, share information and to allocate responsibilities. A possibility offered through specific applications that is noteworthy, is that it is possible to take existing information and to convert these information into Gantt-diagrams that deliver an overview of the current status of the project. To cite an example for these specific kinds of applications, there is "Merlin-Project Management". In this regard the app "Shareplus", which will be dealt with in chapter 4, is to be mentioned. This application enables the user to perform all the important functions from any location around the world with an internet connection.

Another application, which supports specifically the data acquisition at stage 2 of the factory planning process, is "MyMeasures". The app enables the user to capture and dimension various machines or factory buildings with the integrated camera of the mobile device. By using an application like "MyMeasures", the time needed for data acquisition could be shortened. The application, for example, offers the possibility to share pictures of machines with team members, so that they can start creating CAD-models simultaneously. Additionally, the dimensioning feature helps delivering all

needed information. The field of application is being extended by the deployment of a quadrocopter or similar devices.

Through this flexible data sharing, a location-independent work is made possible. A supportive feature is the integration of cloud services. By using cloud services, it becomes possible to upload information from any location and at any time, which can be retrieved anywhere through mobile devices. Therefore this kind of usage offers a vast potential, regarding stages 3 to 7 of the factory planning process. There are such applications available for various mobile devices. For example the "Autodesk 360" services from Autodesk, which include cloud services as well as a limited version of the known "AutoCAD" software, which can be used as a viewer for CAD drafts, but additionally provides a basic tool to adapt drawings if needed. This makes on-site activity possible, even if there is no PC available.

Another field of application arises from the start up phase and the later operation of factories and facilities. By the use of mobile devices in this sector it is possible to monitor logistic- or production-related information.

To what extent this exemplarily mentioned utilization can be deployed in the field will be discussed in the following chapter.

4 Practical examples

Project management as an important discipline within the factory planning has lots of benefits by deploying mobile devices and its applications. To these belong the mobile usage of groupware, calendar and email, which increases the availability of these services. Furthermore, the possibility of social software enlarges networking and the provision of information for the personel.

In first project applications, dedicated applications could be used for the support and communication within the team. Furthermore, information could have held actual and consistent during the whole planning period. One possible software being used in this context, is the SharePlus application, which is also being used at the IMAB (Insitut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit) at the TU Clausthal for the illustration and revision of different contents, based on the groupware solution SharePoint from Microsoft (Fig. 4)

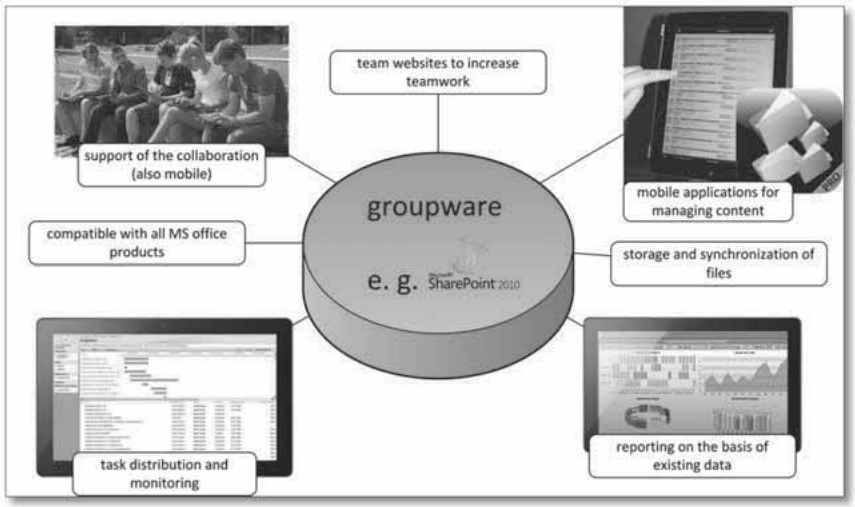


Figure 4: *Groupware-Employment within different projects*

The hereby deployed functions come down to storage and synchronization of different documents. These can be shared with other team members and be used for the allocation of responsibilities. Afterwards, a report based on existing data can be developed. Additionally the usage of groupware can lead to an increased collaboration. The deployment of mobile devices helped to develop brighter conditions of communication within the project team.

The usage of mobile devices had also various positive effects on the data acquisition, especially for small and midsized companies (Fig.5).

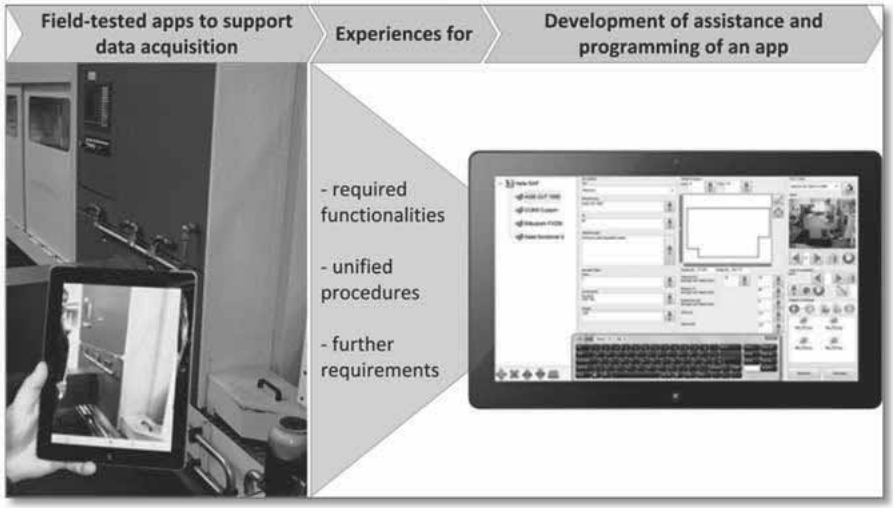


Figure 5: *Development of a data acquisition app at the IMAB*

These small and midsized companies often do not offer important data in the appropriate format. Mobile devices facilitate the digital on-site capturing and make an immediate transfer of information to the server possible.

First of all, commercially available applications have been reviewed in terms of eligibility for the digital factory. Based on various requirements, that have been noticed throughout several tests and experiences of first projects, the IMAB developed an assistant for smart and mobile data acquisition. Practical attempts showed a decrease of time exposure from 40 to 20 minutes per captured machine. In total, a time saving of 30 per cent could be reached compared to the conventional procedure. Due to the fact that necessary data was already available, a minimization of post-treatment could be achieved.

Figure 6 shows the deployment of a drone for a simplification of the data acquisition. Caused by the compact size, high performance, good handling and exceptional flight characteristics, it also can be used for indoor recordings.

Figure 6: *Aerial image with Parrot AR.Drone and Tablet-PC*

A quadrocopter equipped with a camera can be used for areas that are difficult to access and for the recording of Top-Views. The drone can be controlled with a Tablet-PC and streams the pictures immediately via WLAN to the mobile device.

Currently, the application of apps for the support of digital layout planning is being evaluated. In this context, augmented reality and the participation of team members play a vital role.

Especially in the context of simulation, new applications show possible ways of mobile interaction. Figure 7 shows real-time data and forecast data for the information of employees in the start up phase and the later operation of factories and facilities.

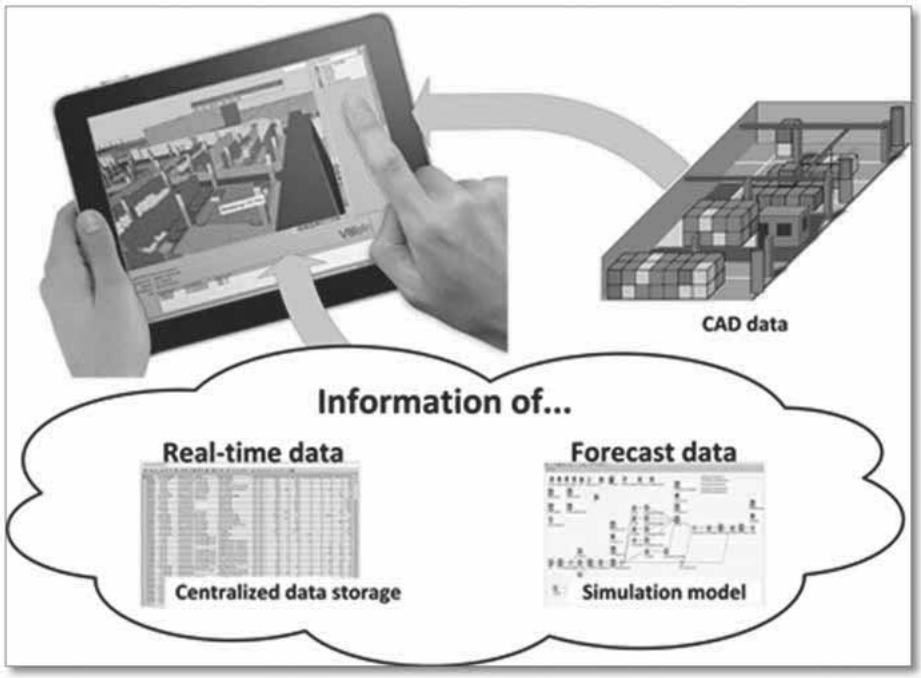


Figure 7: *Monitoring of real-time and forecast data based on simulation*

The centralized data storage provides the necessary data for mobile application that gives the planner real-time simulation information, which are supported by CAD data on-site (Hackenberg 2011).

To achieve the wanted results, the processes and the usage of modern tools, such as mobile devices have to be optimized.

5 Results

Based on the VDI guideline 5200 "factory planning" and the VDI guideline 4499 "Digital factory", this paper deduces the first smart applications, which contain a vast potential for the factory planning.

Additionally, self-developed applications were pointed out and evaluated by practical examples. Furthermore, the paper detects possible savings that the new methods can afford. These savings were ensured within the first practical experiences.

Mobile devices offer the possibility to simplify planning processes in order to keep up with competitors by increasing the efficiency of the processes of the product lifecycle. Though the smart factory planning is in its beginnings, first applications proved the vast potential it inherits. One first result is the necessity to adapt the current processes to modern and smart processes for mobile factory planning. In this context, one has to keep in mind, that there are more modern tools like drones besides mobile devices, which support the planner during the planning process. Only

this will lead to the entire exploitation of the potential benefit of mobile devices in the field of factory planning.

References

Amberg, M.; Lang, M.: Innovation durch Smartphone & Co. Die neuen Geschäftspotenziale mobiler Endgeräte. Düsseldorf: Symposium Publishing 2011

Bitkom, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien: Tablet Computer verbreiten sich rasant. Presseinformation, Berlin, 2012

Bracht, U.: Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik. In Tagungsband: Simulation und Visualisierung, Magdeburg (GER), 28.02. – 01.03.2002

Bracht, U.; Masurat, T.: The digital factory between vision and reality. Computers in Industry 56 (4), S. 325-333

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Heidelberg: Springer 2011

Bracht, U.; Brosch, P.; Sontag, T.: Mobile Anwendungen im Rahmen der Digitalen Fabrik – Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Smartphones und Tablet-PCs. Werkstattstechnik online, Jahrgang 102 (2012) H.3, S. 98-102

Hackenberg, W.; Integrierter Monitoringansatz für die operative CKD-Logistik, Dissertation, TU Clausthal, Shaker 2011

Maske, P.; Mobile Applikationen 1 - Interdisziplinäre Entwicklung am Beispiel des Mobile Learning. Wiesbaden, Springer Gabler, 2012

Reichert, J.: Methodik zur Verbesserung bei der IT-gestützten Fabrikplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. Aachen: Shaker 2009

Schenk, M.: Digitale Fabrik – Realisierungsstand und Chancen. In Symposium des Innovationsforums „Digitale Fabrik“, Zwickau (GER), 08. – 09.09.2009

Schreiber, W.; Zimmermann, P.: Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Heidelberg: Springer 2011

Spillner, A.: Entwicklung, Stand und Perspektiven der Digitalen Fabrik. Dissertation, TU Clausthal, Shaker 2011

VDI guideline 4499 part 1 „Digital factory - Fundamentals“, Beuth Verlag, Berlin, 2008

VDI guideline 5200 part 1 „Factory planning – Planning procedures“, Beuth Verlag, Berlin, 2011

Westkämper, E.; Engineering Apps. Werkstattstechnik online, Jahrgang 102 (2012) H.10, S. 718-722

Yüzgülec, G.; Groß, S.; Ciprina, A.; Zajac, M.; Langanke, D.: Supply Chain Execution Supported by Logistics IT Services. In: Clausen, U.; Ten Hompel, M.; Klumpp, M.: Efficiency and Logistics, Berlin, Heidelberg: Springer 2013

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Optimierungsmethoden der Reihenfolgeplanung mit Hilfe von Simulation

Optimization methods of sequence planning using simulation

János Jósvai, Széchenyi István Universität, Győr (Hungary), janos.josvai@sze.hu

Abstract: The paper focuses on the permutation flow shop problem (PFSP) and its solving optimisation methods. The research work has investigated evolutionary, heuristic and metaheuristic methods. Two mainly different test environments were used. The first one was an often-used theoretical PFSP test problem; the second one was a real-world problem and its application. Simulation models were built using Plant Simulation to investigate the performance of the methods on these problems. Direct production data is used in the real-world model. The research work established optimisation tools within the simulation environment. Large amount of simulation runs provided results to evaluate the different simulation optimisation tools. A modified heuristic algorithm has been recommended in this paper. According to the theoretical experiments a real-world investigation was performed to determine the efficiency of simulation optimisation tools in real-world application.

1 Einführung

Produktionssysteme müssen heutzutage auch unter schwierigen Planungsprämissen ein positives Ertragsergebnis gewährleisten. Insbesondere erschweren kurzfristige Auslastungsschwankungen eine belastbare Planung. Komplexe Endprodukte, eine hohe Anzahl von Produktvarianten (mass customization) und unterschiedlichste Produktkonfigurationen erschweren zusätzlich die Einhaltung der Ertrags- und Qualitätsziele und schaffen neue technologische Herausforderungen.

Ein weiterer Aspekt der die Planung von Produktionssystemen maßgeblich beeinflusst sind die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen. Innovationen aus Forschung und Entwicklung sollen in möglichst kurzer Zeit auf den Markt gebracht werden. Folgende Tendenzen belegen diese Entwicklung:

- Bei gesteigertem Angebotsspektrum um 25 Prozent auf knapp acht Modelle pro Marke haben sich die Modellzyklen im Automobilbau während der letzten 20 Jahre um ca. 4 Jahre verkürzt.
- Wurden Ende der 80er Jahre im Mercedes-Produktionsverbund noch 0,9 Anläufe pro Jahr realisiert, so sind es aktuell durchschnittlich 2,5 Anläufe pro Jahr.

- Innovation und technischer Fortschritt werden als wettbewerbsdifferenzierende Merkmale erkannt und systematisch verfolgt. Der damit verbundene schnelle Wechsel in den Fahrzeuggenerationen führt zu einer Häufung von Neuanläufen in der Automobilindustrie.

Der Eigenfertigungsanteil der Original Equipment Manufacturer (OEM) wird bis 2015 weiter von 35% auf 20% abnehmen. Dies führt zu weiteren strukturellen Veränderungen in der Automobilindustrie. Steigende Variantenzahlen, kürzere Produktlebenszyklen und vieles mehr führen zu einer enormen Komplexität in Produktionssystemen, was eine große Herausforderung in den Bereichen Flexibilität und Produktivität darstellt. (Ackermann 2007; Erdélyi 2009; Hejazi und Saghafian 2005; Näser 2007)

Produktionsplanung und Produktionssteuerung wurden durch wirtschaftliche Ziele und durch Zunahme von Produktvarianten bedeutend, damit der Erfüllungsprozess der Bestellungen gesteuert werden kann. (Hopp und Spearman 2008; Kühn 2006)

Dieser Artikel bezieht sich auf die klassische Montagelinie, die durch Henry Ford eingeführt wurde. Die einzelnen Montagestationen sind durch ein getaktetes Fördersystem verkettet. Diese Art von Montagelinien wird auch Flowshop System genannt. In diesem Fall müssen $n(1,\ldots,n)$ Aufträge auf $m(1,\ldots,m)$ Maschinen erfüllt werden. Die Ausführungszeit an der jeweiligen Station für einen Auftrag soll mit $T_{k,j}$ bezeichnet werden, wobei $k=(1,\ldots,m)$ und $j=(1,\ldots,n)$ *feste* Zeitwerte, im voraus bekannt und nicht negativ sind. Folgende allgemein anerkannten Voraussetzungen dieser Problemstellung, die auch Permutation Flow Shop Problem (PFSP) genannt wird, sind (Hejazi und Saghafian 2005; Ruiz und Maroto 2005; Zobolas et al. 2009):

1. Jeder einzelne Auftrag darf gleichzeitig nur auf eine Maschine ausgeführt werden.
2. Jede einzelne Maschine darf gleichzeitig nur mit einem Auftrag beschäftigt sein.
3. Das Unterbrechen der Ausführung eines Auftrages ist verboten.
4. Die Aufträge sind unabhängig voneinander und am Anfang verfügbar.
5. Die Rüstzeiten der Maschinen sind minimal, deshalb werden sie vernachlässigt.
6. Die Maschinen stehen in Vollzeit zur Verfügung.
7. Eine Zwischenlagerung zwischen den Stationen ist erlaubt.

Das Ziel dieser Problemstellung ist eine optimierte Auftragsreihenfolge unter gegebenen Kriterien zu bestimmen. In der Literatur ist das meistangewandte Kriterium die Minimierung der Durchlaufzeit (C_{max}).

2 Testumgebung für Reihenfolgeplanung

Um die Problemstellung von PFSP genauer untersuchen zu können, werden für den Problemkreis entsprechenden Testaufgaben benötigt. Um die Leistungsfähigkeit der Lösungsmethoden analysieren zu können, werden mehrere Aufgabenspezifikationen mit unterschiedlicher Schwierigkeit und Größe gebraucht. Während der Untersuchung wurden die unterschiedlichen Lösungsmethoden mit Hilfe von theoretischen Testaufgaben und realen Daten aus der Industrie analysiert.

2.1 Theoretische Testaufgaben

Laut Literaturrecherche benutzen zahlreiche Autoren die Testaufgabensammlung von Taillard (1993). Diese sehr häufig angewendete Aufgabensammlung beinhaltet

Problemstellungen von unterschiedlicher Komplexität. Die Maschinenanzahl liegt bei 5 bis 20 Maschinen, wobei die Auftragszahl minimal 20, maximal 500 sein kann. Hier sind die Aufträge unterschiedlich voneinander. In der vorher definierten Problemstellung gehören zu jedem Maschinen-Auftrags-Paar zehn unterschiedliche Arbeitszeitmatrizen. Während der Untersuchungen wurden alle von den Arbeitszeitmatrizen definierten Probleme für jedes Maschinen-Auftrags-Paar ausgewertet. Um die Leistungsfähigkeit bestimmen zu können wurden die bisher besten Ergebnisse betrachtet, die der Aufgabenspezifikation beigefügt waren. Der sogenannte Relativ Percentage Deviation Parameter wurde mit Hilfe der Analyseergebnisse *(Ergebnis)* und den (Aufgabenspezifikation beinhaltenden) bisher besten Ergebnissen *(Best)* bestimmt. Die Formel wird von Gleichung 1 angegeben.

$$RPD = \frac{Ergebnis - Best}{Best} \cdot 100 \tag{1}$$

2.2 Industrielle Problemstellung

Um die Leistung der Methoden zu prüfen wurde eine Problemstellung anhand eines realen Industrieproblems definiert. Die erstellte Produktionsumgebung beinhaltet 57 Maschinen, und es werden 40, bzw. 227 Aufträge erfüllt. Der Basiswert dieser Umgebung wird von dem ursprünglichen Planungsprogramm aus der Industrie bestimmt, das Ergebnis dieser Reihenfolge ist der Grundwert für die Methodenanalysen, der RPD Wert wird in diesem Fall anhand des Planwertes *(Plan)* bestimmt. Die Rechnungsweise wird in Gleichung 2 angegeben, wobei mit *Ergebnis* die aktuelle Leistung der untersuchten Methode bezeichnet wird.

$$RPD = \frac{Ergebnis - Plan}{Plan} \cdot 100 \tag{2}$$

3 Lösungsmethoden

Die untersuchte PFSP-Aufgabe ist NP-vollständig, für die Lösung können evolutionäre und heuristische Methoden angewendet werden. In der Literatur wurden diejenigen Verfahren gesucht, welche die beste Leistung zeigen, rekonstruierbar und implementierbar, bzw. praxistauglich sind. Die Methoden aus dem *State of the art* wurden ausgewählt und weiterentwickelt.

- Genetische Algorithmen: Dies ist eine der bekanntesten evolutionären Verfahren, die Rekombinationsparameter ermöglichen problemorientiertes Tuning.
- NEH Heuristik: Diese Methode wurde von Nawaz et. al. entwickelt, kann als „alt“ bezeichnet werden, liefert jedoch sehr gute Ergebnisse. (Nawaz et al. 1983)
- IGA Verfahren: Ist eine konstruktive Heuristik, hat aber konstruktive und destruktive Phasen, die von lokaler Suche ergänzt wird. Dabei wird auf iterativer Weise das Ergebnis bestimmt. (Ruiz und Stützle 2007)

Um die ausgewählten Verfahren zu implementieren und auszuführen und um geeignete Produktionsprozesse dynamisch zu simulieren, wurde die Plant Simulation Umgebung benutzt. Nach der Implementierung des NEH Verfahrens wurde diese Umgebung weiterentwickelt. Die Modifikation untersucht die Durchlaufzeit der zu

produzierende Produktpaare. Die Implementation wurde ausgearbeitet. Die Methode wird als PNEH bezeichnet. Es wurden Simulationsläufe ausgeführt, um die genannten Problemstellungen zu analysieren.

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse für kleine Auftragszahlen zusammen. Die Produktionsstrukturen mit 5, 10 und 20 Maschinen mussten 20 unterschiedliche Aufträge produzieren. Alle theoretischen Testaufgaben beinhalten den Best Wert für die Durchlaufzeit. Die RPD Leistungen wurden unter Verwendung der bereits beschriebenen Formel bestimmt. Tabelle 1 fasst die Durchschnittswerte der RPD Ergebnisse der zu einem Maschine-Auftrags-Paar gehörenden zehn Problemstellungen zusammen. Es ist gut erkennbar, dass das PNEH Verfahren für die benannten Aufgaben eine bessere Leistung liefert als die NEH Heuristik.

Tabelle 1: *Leistungen der NEH und PNEH Verfahren (RPD [%])*

Anzahl der Maschinen	NEH	PNEH
5	3,25	2,96
10	4,59	4,17
20	3,7	3,56

Die Plant Simulation Simulationssoftware enthält ein hochentwickeltes eingebautes auf Basis des genetischen Algorithmus funktionierendes Optimierungsinstrument, im Weiteren TGA genannt. Zu dessen Konfiguration wurden zahlreiche Operatoreinstellungsexperimente durchgeführt. Als Referenz wurde der Parametersatz verwendet, der das bestmögliche Ergebnis lieferte. Das TGA Instrument ist zurzeit *State of the art,* die Leistungen der sonstigen Methoden wurden mit den optimierten Ergebnissen des TGA verglichen.

Das Ergebnis der Forschungsarbeit zeigt, dass sich für die Lösung der PFSP Aufgabe, neben dem genetischen Algorithmus, die NEH und IGA Heuristiken als beste Methoden erwiesen.

Mittels des definierten Indikators (s. Gl. 3) wurden die bei den theoretischen Aufgaben erreichten Werte – früher definiert als RPD – mit der Leistung des TGAs verglichen. Die prozentuellen Werte in den Tabellen 2 und 3 zeigen den Durchschnitt der Verhältniszahlen bei den Methoden. Die Tabellen bieten ein Punktesystem, um zur Lösung einer gegebenen Aufgabe den richtigen Algorithmus zu wählen.

$$Ind_{Heur(M,J)} = \frac{\overline{RPD}_{Heur(M,J)}}{\overline{RPD}_{TGA(M,J)}} \tag{3}$$

Tabelle 2: *Indikatoren der Simulations-Optimierungswerkzeuge*

Leistung ($Ind_{Durchschn.}$)		Rechenzeit	
IGA	27,3 %	NEH	6,7 %
Neue PNEH	68,7 %	Neue PNEH	20,5 %
NEH	69,4 %	TGA	100 %
TGA	100 %	IGA	1197 %

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der kleinen und mittelgroßen Modelle zusammen. Eine Bewertung des Verfahrens ergibt, dass

- die IGA Methode die besten Ergebnisse liefert
- die NEH Methode die geringste Rechenzeit benötigt,
- was beide Gesichtspunkte anbelangt, das neuentwickelte PNEH Verfahren eine ausgeglichene Leistung liefert.

Die in der industriellen Praxis vorkommenden kurzen Entscheidungszeiträume bedingen schnelle Rechenmethoden. Die Methoden mit längerem Zeitbedarf bieten ein genaueres Ergebnis, ihr Einsatzgebiet liegt in der Zusammenstellung der wöchentlichen Produktionsprogramme. Die ständige Leistungszunahme der Hardware wird in geraumer Zeit die tägliche Anwendung der sehr rechenintensiven Lösungsmethoden ermöglichen.

Die Ergebnisse für die Berechnung von als klein bewertete Aufgaben sind in der Tabelle 3 zu sehen. Für die Größe der Aufgaben ist es charakteristisch, dass aus 5, 10 und 20 Maschinen bestehende Systeme etwa 20 verschiedene Produkte in dem untersuchten Zeitabstand produzieren. Die Ergebnisse der Tabelle zeigen den Durchschnittswert aller Leistungskennzahlen und der Rechenzeit. Nach der Analyse ist festzustellen, dass im Falle der beiden Aspekte die neuentwickelte PNEH Methode das beste Ergebnis bietet.

Tabelle 3: *Reihenfolge der Optimierungswerkzeuge bei kleinen Auftragszahlen der theoretischen Testdaten*

	Leistung ($Ind_{Durchschn.}$) und Rechenzeit
Neue PNEH	68 %
NEH	71 %
TGA	100 %
IGA	167 %

Während der Forschungsarbeit wurde neben der Modellierungssoftware eine Optimierungslösung ausgearbeitet, die im Falle einer gut definierten Aufgabe eine Reaktion vor Produktionsbeginn und bei Störung eine sofortige Reaktion in der Planung ermöglicht. Auf Grund der Experimente wurde bestätigt, dass mit der Hilfe der Methode die Zeit der Optimierung reduziert werden kann. Diese Entwicklung

kann die Einsetzung der implementierten Methoden in die industrielle Umgebung beschleunigen und sie kann die Optimierung und die erreichten Werte verbessern. Die in der Struktur des Produktionssystems und in der Produktzusammensetzung zu erfolgenden Methodenänderungen fordern weitere Entwicklungsarbeit.

4 Zusammenfassung

Die Produktions-Simulation und Analyse von Industriesystemen hat ein sehr bedeutendes Potential. Die untersuchten Optimierungswerkzeuge können in der Praxis auf Basis der theoretischen und industriellen Versuche und bezogen auf Leistung und Laufzeit angewendet werden. Anhand der Ergebnisse der Forschung und laut der Rückmeldung aus der Industrie können bei dieser Art von Optimierung 2-10% Zuwachs in der Produktionsmenge erreicht werden. Für die Forschung ergibt sich ein sehr breiter Entwicklungsbereich für die Optimierung mit Hilfe von zusammengesetzten Zielfunktionen, wobei die Einflüsse der Produktionsmengen der Produktvarianten auf die Leistungsfähigkeit der Lösungsmethoden untersucht werden können.

Literatur

Ackermann, J.: Modellierung, Planung und Gestaltung der Logistikstrukturen kompetenzzellenbasierter Netze. Dissertation, TU Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Heft 59, 2007.

Erdélyi, F.: A globális válság néhány technológiai vonatkozása. In Gépgyártás XLIX. 3., S. 13-21, 2009.

Hejazi, S. R.; Saghafian, S.: Flowshop-scheduling problems with makespan criterion: a review. In International Journal of Production Research, Vol. 43, No. 14., S. 2895-2929, 2005.

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory Physics. Third Edition, McGraw Hill 2008.

Kühn, W.: Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner. München Wien: Carl Hanser 2006.

Näser, P.: Methode zur Entwicklung und kontinuierlichen Verbesserung des Anlaufmanagements komplexer Montagesysteme. Dissertation, TU Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Heft 56, 2007.

Nawaz, M.; Enscore, Jr.; E.E., Ham, I.: A heuristic algorithm for the m-machine, n-job, flow-shop sequencing problem. OMEGA, The International Journal of Management Science, 11 (1), S. 91-95, 1983.

Ruiz, R.; Maroto, C.: A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics. European Journal of Operational Research, 165, S. 479-494, 2005.

Ruiz, R.; Stützle, T.: A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. European Journal of Operational Research, 177., S. 2033-2049, 2007.

Taillard, E.: Benchmarks for Basic Scheduling Problems. European Journal of Operational Research, 64., S. 278-285, 1993.

Zobolas, G.I.; Tarantilis, C.D.; Ioannou, G.: Minimizing makespan in permutation flowshop scheduling problems using a hybrid metaheuristic algorithm. Computers & Operations Research, 36., S. 1249-1267, 2009.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Grafisches Werkzeug zur Erstellung von Optimierungsalgorithmen für komplexe Montagesysteme

Graphical tool to create optimisation algorithm for complex assembly lines

Daniel Bohn, Evangelos Angelidis, Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany), daniel.bohn@unibw.de, evangelos.angelidis@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Abstract: In this paper we focus on solution strategies for scheduling problems of complex assembly lines with workforce constraints. Typical products are airplanes, industrial machines and turbines which are produced by multi-skilled resources in small series or are even unique items. This production is defined as a Multi-Mode Resource-constrained Multi-Project Scheduling Problem with activity splitting. It is a combinatorial order problem which is NP-hard. Simulation-Based Optimization offers an auspicious manner of dealing with those domain specific problems. In our paper we present a graphical tool to create optimization algorithm for such problems. Additionally we give an example of the main features and advantages of this modelling approach.

1 Einführung

In den letzten Jahrzehnten gewann die Produktionsplanung und -steuerung immer mehr an Bedeutung. Unternehmen sind gegenwärtig mehr denn je gezwungen, Produktionskosten zu minimieren, um sich im internationalen Markt zu etablieren. Schwerpunkt unserer Forschung bildet daher die Optimierung der Produktion von industriellen Maschinen in Kleinserien und von Unikaten. Da das Problem als NP-schwer klassifiziert ist, wie in Pappert et al. (2010) beschrieben, kann es nicht in kurzer Zeit mit klassischen Methoden gelöst werden. Unser Ziel ist es daher, unter Einsatz der simulationsbasierten Optimierung (SBO) und mit Hilfe verschiedener Heuristiken in kurzer Zeit ein passendes Szenario zu erstellen. Dafür wurde eine modellgetriebene SBO-Plattform (SBOP) entwickelt, die mit minimalen Entwicklungs- und Zeitkosten entsprechende Lösungsverfahren für Unternehmen bietet. Die vorliegende Publikation widmet sich der Analyse von SBOP und präsentiert einen grafischen Modellierungsansatz, um Fachanwender in die Lage zu versetzen, selbst Optimierungsalgorithmen zu entwickeln.

2 Problembeschreibung

Diese Publikation beschäftigt sich mit der Optimierung von komplexen Montagelinien zur Herstellung von bspw. Turbinen, Flugzeugen, industriellen Maschinen in Kleinserien und Unikaten. Hierbei besteht das Fabrikmodell aus unterschiedlichen Aufträgen. Die Aufträge wiederum bestehen aus verschiedenen Produkten mit unterschiedlichen Produktionsplänen, Rangfolgebeschränkungen, Montagecharakteristiken von Maschinen und Tausenden von Arbeitsvorgängen. Die unterschiedlichen Ausführungen der Arbeitsvorgänge werden mit Hilfe von sogenannten Modi beschrieben. Diese definieren die Menge der Qualifikationen der zugeordneten Ressourcen und die Bearbeitungszeit für die einzelnen Arbeitsvorgänge. Die Arbeitsvorgänge und Produkte haben viele zeitgebundene Anforderungen wie bspw. muss ein Teil des Produktionsplans in einer bestimmten Zeit abgearbeitet sein, damit der Klebstoff nicht austrocknet bevor die entsprechenden Werkstücke zusammengeführt sind. Ein weiteres Merkmal der Produktion ist die beschränkte Verfügbarkeit der Ressourcen (Schichten, Pausen und Ausfälle) und die endlichen Puffer. Ein vereinfachtes Fabrikmodell wird in Abbildung 1 aufgezeigt. Die Arbeitsvorgänge sind hier durch Verbindungslinien zwischen 2 Knoten (dargestellt als Kreis) abgebildet. Durch den Knoten wird bestimmt, welcher Arbeitsvorgang als nächstes abgearbeitet wird. Handelt es sich um einen Knoten mit paralleler Abarbeitung, werden alle nachfolgenden Arbeitsvorgänge bearbeitet. Bei einem alternativen Knoten wird nur ein bestimmter Arbeitsvorgang durchgeführt. Dem Arbeitsvorgang zugeordnete Ressourcen sind durch Quadrate unterhalb des Vorgangs abgebildet, hierbei wird auf die Unterscheidung nach Qualifikation verzichtet.

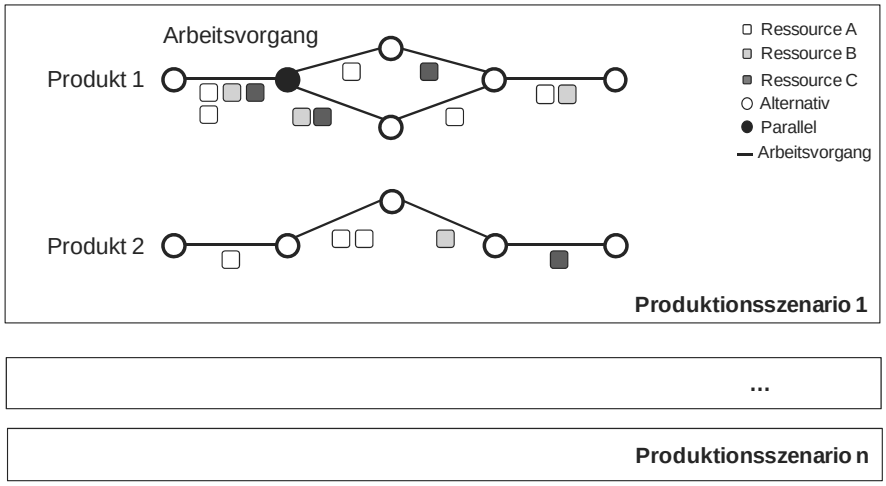


Abbildung 1: *Fabrikmodell mit unterschiedlichen Produktionsszenarien*

Die Optimierung solcher Montagelinien ist ein komplexes kombinatorisches Problem und wird in der Literatur häufig als Multi-Mode Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem (MMRCMPSP) with activity splitting bezeichnet. Es handelt sich dabei um ein NP-schweres Problem, das in realen Dimensionen nicht

mit klassischen Ansätzen in kurzer Zeit gelöst werden kann. Die Forschung in diesem Bereich basiert vor allem auf kleinen oder mittelgroßen Problemen, die häufig durch exakte Ansätze oder genetische Algorithmen gelöst werden. Ein alternativer Weg, um eine Lösung in kurzer Laufzeit zu finden, ist der simulationsbasierte Optimierungsansatz wie er in (April et al. 2003; Law und McComas 2002; Pappert et al. 2010; Shapiro 1996) beschrieben ist. Die grundlegende Idee dieses Ansatzes ist es, aus dem Fabrikmodell ein Simulationsszenario zu definieren, es anschließend zu simulieren, zu analysieren und ein neues Szenario unter Berücksichtigung der vorliegenden abgeschlossenen Szenarien und des Fabrikmodells zu erstellen. Ziel dieser Iterationen ist es, innerhalb weniger Schritte eine zulässige Lösung zu finden. Dabei werden für die Erstellung des Simulationsszenarios verschiedene Techniken verwendet. Diese können zum Einen genetische Algorithmen und zum Anderen iterative Algorithmen sein (Pappert et al. 2010; Angelidis et al. 2012a; Angelidis et al. 2012b). Die Integration der Algorithmen in die Plattform (SBOP) geschah bisher auf Code-Ebene, was sich aufgrund der Komplexität des Algorithmus sehr schwierig und zeitaufwändig gestaltete. Des Weiteren wurden die ersten Entwürfe des Algorithmus auf Papier angefertigt, was wiederum eine Arbeit im Team sehr schwierig und eine Versionierung nahezu unmöglich machte.

3 Simulationsbasierte Optimierungsplattform

In der Optimierung von Montagelinien bedarf es neuer Lösungsstrategien, die mit riesigen Suchräumen umgehen können und innerhalb kurzer Laufzeiten ein passendes Szenario finden. Der erste Ansatz eines Frameworks, das sich mit dieser Problemstellung beschäftigt, wird in Pappert et al. (2010) beschrieben. Das nachfolgend beschriebene Konzept stellt eine Weiterentwicklung dar.

Die erste Herausforderung besteht darin, das reale System in ein sogenanntes Fabrikmodell zu transformieren. Dieses Modell beschreibt die Produktionsanlage und enthält alle notwendigen Informationen, um alle möglichen Produktionsszenarien abzubilden. Der Optimierer stellt basierend auf der Lösungsstrategie und der bereits simulierten Szenarien Simulationsmodelle zur Verfügung. Durch die Einbeziehung der Ergebnisse von vorangegangenen Szenarien wird versucht, eine Erhöhung der aktuellen Lösungsbewertung zu erzielen. Die Ergebnisse einer Simulation werden als Simulationslog bezeichnet.

Das Simulationsmodell enthält alle Produktionspläne mit angepasstem frühesten Start- und spätestem Endtermin. Diese werden als activity-on-arc (AOA) Netzwerke mit alternativen Produktionspfaden definiert. Die zu den Produktionsplänen zugehörigen Arbeitsvorgänge haben ebenfalls angepasste früheste Start- und späteste Endtermine sowie einen gewählten Modus, mit dem die Menge und die Qualifikation der zugeordneten Ressourcen bestimmt werden. Die Ressourcen wiederum haben definierte Verfügbarkeitspläne. Weiterhin besitzt das Modell eine Liste von ausgewählten Prioritätsregeln und anderen Eigenschaften, um das Modell realitätsnah abzubilden.

Der Simulationslog enthält alle notwendigen Informationen, um das Szenario zu beschreiben und zu bewerten, wie bspw. die Zustände der Ressourcen und den Zeitplan der Arbeitsvorgänge. Aufbauend auf diesen werden die unterschiedlichen Key Performance Indicators (KPI) berechnet, damit der Optimierer den kompletten

Simulationszyklus effizienter auswerten kann. Bspw. könnte das die Restzeit (Differenz zwischen Liefertermin und Fertigstellungszeitpunkt) von Produkten, Vorgängen oder Aufträgen sein. Weitere Beispiele sind die Verletzung von Fertigstellungszeiten, Produktionskosten, aber auch Ressourcenauslastung. SEMI (2004) gibt einen Überblick aller verfügbaren KPIs. Der gesamte Ablauf ist in Abbildung 2 dargestellt.

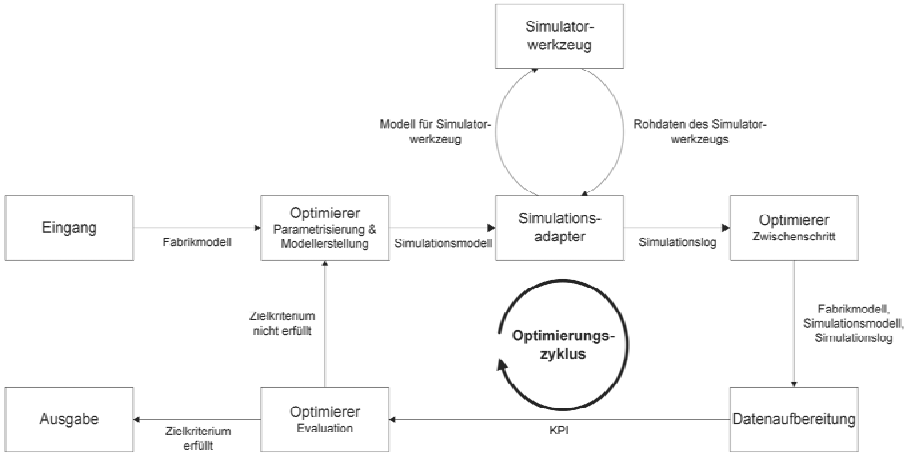


Abbildung 2: *Darstellung eines klassischen Optimierungszyklus*

Mit der Integration des Datenmetamodells in die Plattform wurde die Grundlage für die modellgetriebene Entwicklung gelegt (Angelidis et al. 2011). In einem nächsten Schritt wird der Fachanwender durch den Einsatz eines grafischen Werkzeuges zur Modellierung von Optimierungsalgorithmen in die Lage versetzt, beliebig komplexe Algorithmen selbst zu erstellen und zu validieren. Diese erstellten Algorithmen werden anschließend in der Plattform ausgeführt. Somit wird eine vollständige Integration mit einem einfachen Softwareverteilungsmodell gewährleistet.

4 Entwicklung von Algorithmen durch Visualisierungsmethoden

Um eine modellgetriebene Entwicklung von Optimierungsalgorithmen zu erreichen, wurde die Anwendung Visual Rules (Bosch SI 2013) in die simulationsbasierte Optimierungsplattform integriert. Dies ermöglicht es dem Fachanwender, komplexe Regelsysteme mittels eines Editors zu modellieren. Dabei stehen folgende Elemente zur Verfügung:

- Zuweisung (z.B. um einer Variablen einen Wert zu geben)
- Verzweigung (z.B. um in Abhängigkeit von einem bestimmten Wert einen anderen Teilbaum zu durchlaufen)
- Möglichkeit der Anbindung von Datenbanken (z.B. um auf Daten in einer externen Datenbank zuzugreifen)
- Aktionen
- Serviceaufrufe (z.B. Wiederverwendung von fachlichen Services der Plattform)

- Zustandsautomaten und Ablaufregeln
- Dokumentation
- Etc.

Darüber hinaus bietet es die Möglichkeit, ein vorhandenes Datenmodell während der Erstellung wiederzuverwenden, eine Ablaufregel hierarchisch aufzubauen und einen Zustandsautomaten zu definieren. Der Zustandsablauf kann jederzeit neu gestartet werden und bedarf nicht zwingend eines Endzustands. Des Weiteren wurde die Integration so gestaltet, dass der Zustandsautomat völlig automatisiert abläuft sobald dieser einmal angestoßen wurde. Während der Entwurfsphase stehen sowohl das Datenmetamodell als auch die von der Plattform bereitgestellten Services zur Verfügung, so dass eine vollständige Integration erreicht wird. Das Algorithmusmodell kann zur Laufzeit über einen Web-Service oder eine Java-Schnittstelle ausgeführt werden. Das Zusammenspiel aller Komponenten ist in Abbildung 3 dargestellt.

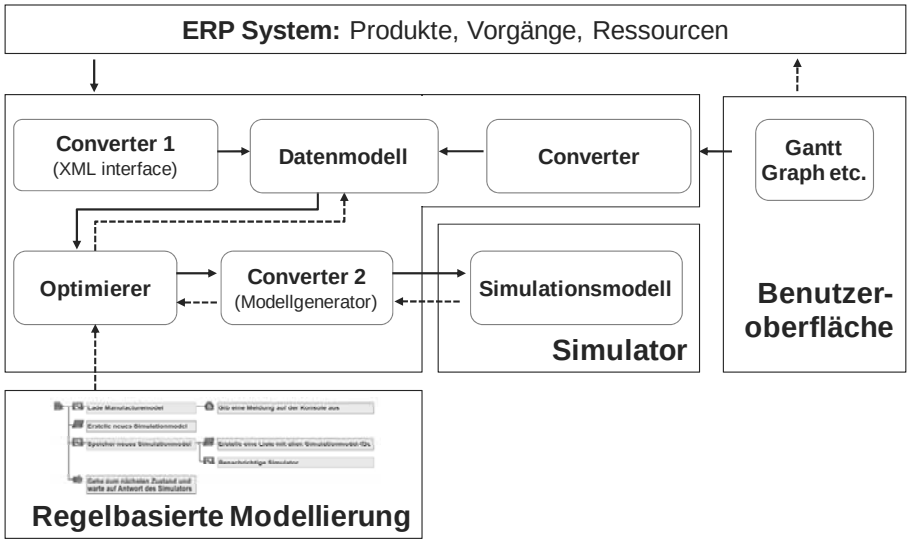


Abbildung 3: *Integration von Visual Rules in SBOP*

5 Beispiel eines iterativen Algorithmus mit Visual Rules

Anhand des folgenden Beispiels soll die Verwendung von Visual Rules für die Erstellung eines Optimierungsalgorithmus gezeigt werden. Dabei steht die Variabilität und einfache Verwendbarkeit des grafischen Werkzeugs im Fokus und nicht die Ausgabe eines repräsentativen praxisrelevanten Ergebnisses. Als Beispiel wird ein dreistufiger Algorithmus verwendet, wie Abbildung 4 zeigt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte im Detail erläutert.

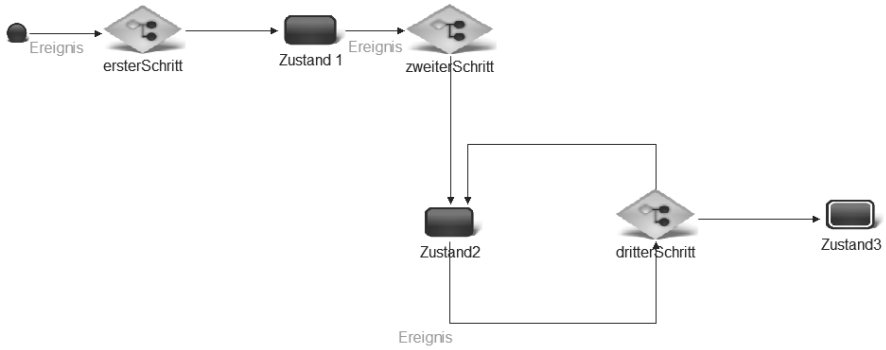


Abbildung 4: *Beispiel eines Optimierungsalgorithmus in Visual Rules*

Im ersten Optimierungsschritt wird das theoretische Maximum für die Optimierung ermittelt. Dies wird mit den folgenden Schritten erreicht und ist in Abbildung 5 dargestellt:

1. Wähle für jede Ressource zu jedem Zeitpunkt die maximal verfügbare Anzahl mit der Folge, dass in diesem Schritt die Schichten der Ressourcen ignoriert werden.
2. Wähle den frühesten Starttermin, spätesten Endtermin für Aufträge, Produkte und Arbeitsvorgänge
3. Wähle eine zufällige Montagecharakteristik (Modus).

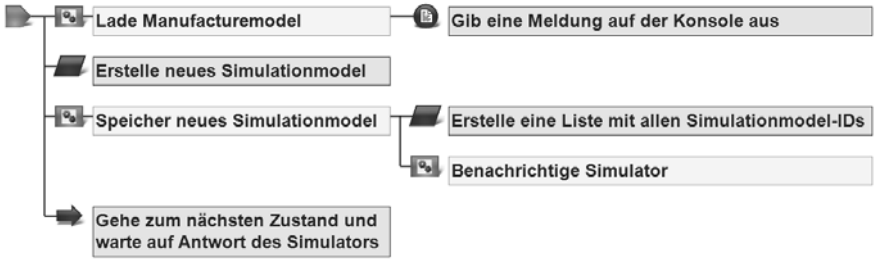


Abbildung 5: *Erster Optimierungsschritt*

Im zweiten Optimierungsschritt wird versucht, die Auslastung der Ressourcen ohne eine Verletzung der Fertigstellungszeitpunkte von Aufträgen, Produkten oder Arbeitsvorgängen zu minimieren. In Abbildung 6 sind die dazu notwendigen Schritte grafisch dargestellt.

1. Wähle den Schichtplan mit der höchsten Verfügbarkeit.
2. Wähle die Montagecharakteristik (Modus) mit der kürzesten Bearbeitungszeit.
3. Setze die folgenden Prioritätsregeln für die Abarbeitungsreihenfolge bei Knotenpunkten:
   a. frühester Endtermin (EDD)
   b. frühester Rahmenstarttermin ERD)

   c. kürzeste Bearbeitungszeit (SPT)
4. Falls das gewählte Szenario kein gültiges Ergebnis liefert, erzeuge ein neues Szenario beginnend von Punkt 1. Jedoch werden bei Punkt 3 andere Prioritätsregeln ausgewählt.

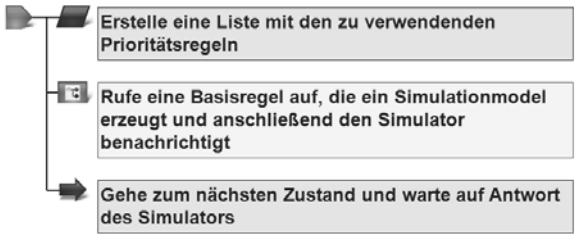


Abbildung 6: *Zweiter Optimierungsschritt*

In Abbildung 7 ist der letzte Optimierungsschritt dargestellt. Er besteht aus den folgenden Schritten:

1. Wähle den Schichtplan mit der höchsten Verfügbarkeit.
2. Wähle eine zufällige Montagecharakteristik (Modus).
3. Verwende dieselben Prioritätsregeln aus Optimierungsschritt 2, die ein gültiges Ergebnis geliefert haben.

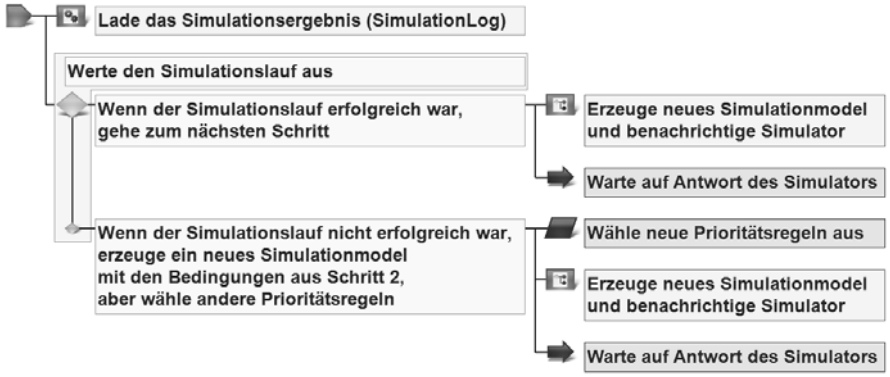


Abbildung 7: *Dritter Optimierungsschritt*

6 Ergebnisse und Zusammenfassung

Durch die Integration und Bereitstellung von Visual Rules wurde eine Möglichkeit geschaffen, bereits in der Entwurfsphase von Optimierungsalgorithmen auf ein grafisches Werkzeug zurückzugreifen. Der Anwender muss also nicht zwingend über Programmierkenntnisse verfügen. Erste Ideen können so modelliert, mit Erläuterungen versehen und erst im weiteren Verlauf mit der eigentlichen technischen Funktionalität hinterlegt werden. Das einfache Verteilungsmodell und der Modellierungsansatz erlauben ein sehr variables und schnelles Ändern und Ausführen von Optimierungsalgorithmen innerhalb der Plattform. Damit wird eine Möglichkeit geschaffen, auf einfache Art und Weise sehr viele Algorithmen zu testen und dessen Ergebnisse gegenüberzustellen. Durch den generischen Ansatz, den Visual Rules bereitstellt, ist es zudem möglich, dieses Werkzeug in anderen Bereichen, wie z.B. bei der Online-Optimierung oder der Berechnung von KPIs einzusetzen. Durch den Einsatz der neuen Methode soll nicht zwingend ein Performancegewinn bei der Ausführung der Algorithmen erreicht werden. Jedoch wird durch die visuelle Darstellung eine Erhöhung der Übersichtlichkeit und damit verbunden eine eventuelle Ideengenerierung für neue Algorithmen gefördert. Desweiteren wird ein zeitlicher Gewinn bei der Erstellung von Algorithmen erreicht.

Literatur

Angelidis, E.; Pappert, F. M.; Rose O.: A Prototype Simulation Tool for a Framework For Simulation-based Optimization of Assembly Lines. In: Jain, S.; Creasey, R. R.; Himmelspach, J.; White, K. P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey (USA), 2011, S. 2383–2394.

Angelidis, E.; Naumann, A.; Rose O. (2012a): An Extended Critical Path Method for Complex Assembly Lines. In: Lim, G.; Herrmann, J. W. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Industrial and Systems Engineering Research Conference, Norcross, Georgia (USA), 2012

Angelidis, E.; Bohn, D.; Rose, O. (2012b): A Simulation-Based Optimization Heuristic Using Self-Organization for Complex Assembly Lines. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher A. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey (USA), 2012

April, J.; Glover, F.; Kelly, J. P.; Laguna, M.: Practical Instroduction to Simulation-Optimization. In: Chick, S.; Sánchez, P. J.; Ferrin, D.; Morrice, D. J. (Hrsg.): Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey (USA), 2003, S. 71-78,

BOSCH SI. Visual Rules. Aufruf am 24.02.2013. http://www.bosch-si.com/de/technologie/business-rules-management-brm/brm-komponenten/visual-rules-modeler.html, 2013.

Law, A. W.; McComas, M. G.: Simulation-Based Optimization. In: Yücesan, E.; Chen, C.-H.; Snowdon, J. L.;Charnes, J. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (WSC) . Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey (USA), 2002, S. 41-44

Pappert, F. M.; Angelidis, E.; Rose, O.: Framework For Simulation-Based Scheduling of Assembly Lines. In: Johansson, B.; Jain, S.; Montoya-Torres, J.;

Hugan, J.; Yücesan, E. (Hrsg.): Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey (USA), 2010, S 1690-1968

SEMI, EMI E10-0304E: Specification for Definition and Measurement of Equipment Reliability, Availability, and Maintainability (RAM), 2004

Shapiro, A.: Simulation Based Optimization. In: Charnes, J. M.; Morrice D. J.; Brunner, D. T.; Swain,J. J. (Hrsg.): Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference (WSC) . Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, NewJersey (USA), 1996, S. 332-336

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulationsbasierte Reihenfolgeoptimierung von Fertigungsaufträgen für Montagesysteme mittels eines genetischen Algorithmus unter Beachtung von Reihenfolgebeschränkungen

Simulation-based sequence optimization for assembly systems using a genetic algorithm and considering line constraints

Marco Lemessi, John Deere GmbH & Co. KG, Mannheim (Germany),
LemessiMarco@JohnDeere.com

Thomas Schulze, Christian Tänzer, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg (Germany), tom@iti.cs.uni-magdeburg.de, christian.taenzer@st.ovgu.de

Abstract: Sequence optimization is a well-known problem in planning the production of mixed model assembly systems. Simulation is often used to describe the structure and the behaviour of these systems. This paper presents a simulation-based algorithm for the sequence optimization of mixed model assembly systems. In multiple optimization runs a genetic algorithm is executed to improve a start sequence of jobs regarding to the cycle time of this sequence. In addition, the optimization algorithm considers line constraints limiting the order of jobs. With these constraints layout and technical aspects of assembly systems are taken into account using Boolean algebra for the definition.

1 Einleitung

Kürzer werdende Produktlebenszyklen sowie eine steigende Kundennachfrage nach mehr Produktvarianten erfordern eine stetige Erweiterung des Produktportfolios eines Unternehmens. So werden auf einer Montagelinie mehrere Varianten eines Produkts produziert (Bukchin et al. 2002). In diesem Zusammenhang ist das Problem der Reihenfolgeplanung von Fertigungsaufträgen, mit dem Ziel eine zeitliche Abfolge der Aufträge für eine gegebene Zielstellung zu bestimmen eine bekannte Aufgabe. Mögliche Zielstellungen sind beispielsweise die Minimierung der Zykluszeit oder die Minimierung der Abweichungen vom Fälligkeitszeitpunkt (Kiener 2006; Pinedo 2012; Zahn und Schmid 1996). Analytische Lösungsverfahren für das Reihenfolgeplanungsproblem liefern optimale Lösungen, jedoch besitzen diese Lösungen, aufgrund von Annahmen zur Vereinfachung, keine Relevanz in realen Produktionssystemen. Aus diesem Grund werden vielfach Heuristiken, zum

Beispiel Tabu-Suche, Simulated Annealing oder genetische Algorithmen verwendet, die in annehmbarer Zeit gute Ergebnisse liefern, ohne aber das Optimum der Lösungen zu gewährleisten (Völker und Schmidt 2010; Zahn und Schmid 1996). Diese Heuristiken werden oftmals mit der Simulation kombiniert, um verschiedene Parameterkonfigurationen des Systems zu evaluieren (Völker und Schmidt 2010).

Für das Problem der Reihenfolgeplanung wird vielfach der genetische Algorithmus aus der Klasse der Heuristiken zur Optimierung herangezogen. In Chen et al. (1995), Iltzsche et al. (2011), Rotondo et al. (2012) sowie in Yasin et al. (2010) wurde gezeigt, dass der Einsatz dieses Algorithmus gute Ergebnisse liefert. Jedoch wird der genetische Algorithmus zur Verbesserung des Ergebnisses nicht mehrmals angewendet.

Oftmals müssen im Zusammenhang mit der Planung von Reihenfolgen gegebene Beschränkungen aus den zu optimierenden Systemen berücksichtigt werden. Hierzu gehören Terminfälligkeiten von Fertigungsaufträgen, die sich aus Kundenanforderungen ergeben. Aus diesen Fälligkeiten lassen sich Bearbeitungsprioritäten ableiten. So haben Fertigungsaufträge mit einer kurzen Terminfrist eine höhere Priorität als Aufträge mit einer größeren Terminfrist. Für diese Art von Restriktionen existieren bereits zahlreiche Lösungsansätze in Form von Reihenfolgeplanungsproblemen mit terminbezogenen Zielgrößen, wie beispielsweise die Minimierung der Verspätungen (Jeffcoat und Bulfin 1993; Mattfeld und Bierwirth 2004). Andere Beschränkungen sind im Layout und in technischen Aspekten eines Montagesystems begründet (Jones und Wilson 1996). Weitere Ursachen für Reihenfolgebeschränkungen sind zum Beispiel spezielle Operationen oder Tätigkeiten sowie Lieferanten-Beziehungen (Jones et al. 1997). Beispiele für derartige Restriktionen sind (Lackes und Awiszus 2012):

- Direkt nach Auftrag A darf kein Auftrag B folgen,
- Zwei Aufträge vom Typ A dürfen nicht direkt aufeinander folgen oder
- Zwischen zwei Aufträgen vom Typ A müssen Aufträge vom Typ B und C vorhanden sein.

Die letztgenannte Art von Reihenfolgebeschränkungen wurde bisher nur unzureichend bei der Reihenfolgeplanung in Verbindung mit Heuristiken berücksichtigt.

Zur Verbesserung der Ergebnisse bei der simulationsbasierten Reihenfolgeoptimierung für Montagesysteme wurde ein neuer Lösungsansatz entwickelt, der charakterisiert ist durch die mehrmalige Anwendung des genetischen Algorithmus, der Verwendung einer booleschen Algebra zur Definition von Restriktionen für Reihenfolgen und die Beachtung von Reihenfolgebeschränkungen bei der Generierung von Reihenfolgen.

In den folgenden Kapiteln wird beginnend die Zielfunktion zur Reihenfolgeoptimierung in Montagesystemen definiert. Anschließend wird der entwickelte Optimierungsalgorithmus erläutert und die Beschreibung von Restriktionen mittels boolescher Algebra aufgezeigt. Die Implementierung des Ansatzes in ein existierendes generisches Simulationsmodell für Montagelinien sowie die Anforderungen der Nutzer werden in einem weiteren Kapitel fokussiert. An einem Anwendungsfall werden anschließend die erreichten Verbesserungen aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Optimierungsproblem

Das vorliegende Problem der Reihenfolgeplanung ist ein Flow-Shop-Problem mit N Fertigungsaufträgen für eine Montagelinie über einen bestimmten Planungszeitraum. Als Optimierungsziel wird die Minimierung der Zykluszeit der zu montierenden Produktreihenfolge definiert (s. Gl. 1). Zur Bestimmung der Zykluszeit einer Reihenfolge wird diese Auftragsreihenfolge mit dem Simulationsmodell simuliert, die Ergebnisdaten gesammelt und ausgewertet. Restriktionen bezüglich der Reihenfolge werden als Nebenbedingung berücksichtigt (s. Gl. 2). Hierbei müssen alle gegebenen Reihenfolgebeschränkungen erfüllt werden. Zusammengefasst lässt sich das Optimierungsproblem formal wie folgt beschreiben:

Variablendeklaration:

L	Anzahl von Reihenfolgen (k = 1,…,L)
N	Anzahl von Fertigungsaufträgen (i = 1,…,N)
R	Anzahl von Reihenfolgerestriktionen (r = 1,…,R)
Seq_k	Reihenfolge k mit k = 1,…,L
C_r	Reihenfolgebeschränkung r mit r = 1,…,R
CT	Zykluszeit
$Z(Seq_k)$	Zykluszeit von Reihenfolge k mit k = 1,…,L
$\Phi(C_r,Seq_k)$	Funktion zur Bestimmung, ob Reihenfolge k die Restriktion r erfüllt mit k = 1,…,L und r = 1,…,R

Zielfunktion:

$$\text{Min} \rightarrow CT = \min_{k=1}^{L} Z(Seq_k) \tag{1}$$

Nebenbedingungen:

$$\sum_{r=1}^{R} \phi(C_r, Seq_k) = R, \forall k = 1,...,L \tag{2}$$

mit

$$\Phi(C_r, Seq_k) = \begin{cases} 1, \text{wenn Reihenfolge k die Restriktion r erfüllt} \\ 0, \text{sonst} \end{cases}$$

$L \in \mathbb{N}^+$; $N \in \mathbb{N}^+$; $R \in \mathbb{N}$; $CT \in \mathbb{R}^+$; $Z(Seq_k) \in \mathbb{R}^+$; $\Phi(C_r,Seq_k) \in \{0,1\}$

3 Optimierungsalgorithmus

Der Optimierungsalgorithmus absolviert mehrere Optimierungsläufe, bis keine signifikante Verbesserung der Zielgröße erzielt oder eine vorgegebene Laufzeitbeschränkung erreicht wurde. Eine Verbesserung bedeutet in diesem Kontext eine geringere Zykluszeit als die Auftragsstartreihenfolge des aktuellen Optimierungslaufs. In jedem Optimierungsdurchlauf wird der genetische Algorithmus, basierend auf einer neuen Startreihenfolge von Aufträgen ausgeführt. Die optimierte Reihenfolge des vorherigen Laufs geht als Startreihenfolge in den genetischen Algorithmus des nächsten Optimierungsdurchlaufs ein. Hierbei dient

die Startreihenfolge als Ausgangspunkt für die Bildung neuer Auftragsreihenfolgen innerhalb des genetischen Algorithmus. Als Eingabegrößen für den Algorithmus werden das Simulationsmodell der Montagelinie, eine existierende Startreihenfolge der Fertigungsaufträge sowie mögliche Reihenfolgebeschränkungen verwendet (s. Abb. 1). Für alle zu simulierenden Reihenfolgen wird das Simulationsmodell mit einem identischen Startzustand initialisiert. Diese Initialisierung bildet eine realitätsnahe Belegung der Montagelinie als Ausgangssituation ab.

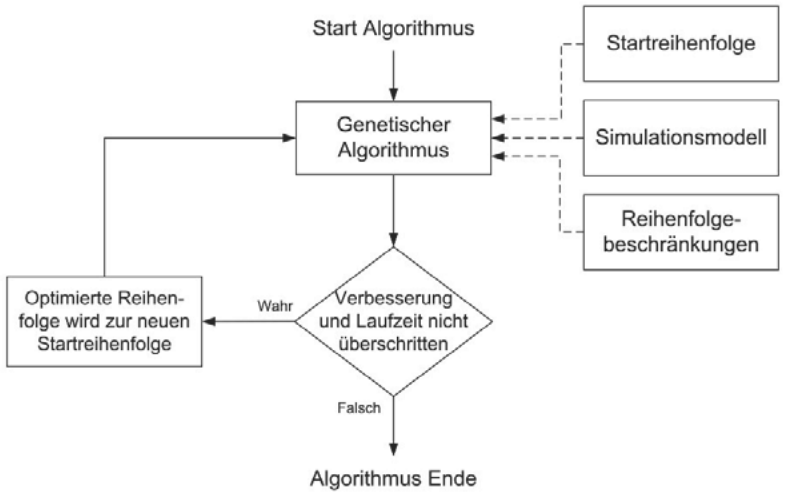


Abbildung 1: *Schematischer Ablauf der Optimierung*

Der genetische Algorithmus ist ein populationsbasierter, evolutionärer Algorithmus, der sich an der biologischen Evolution der Natur orientiert. Damit wird die Fähigkeit der Adaption aufgegriffen (Gerdes et al. 2004). Für das vorgestellte Reihenfolgeplanungsproblem generiert der genetische Algorithmus neue Reihenfolgen von Fertigungsaufträgen durch Anwendung der Selektion und durch Einsatz der genetischen Operatoren (Rekombination und Mutation). Dem Nutzer stehen hierfür innerhalb des genetischen Algorithmus mehrere Verfahren zur Auswahl:

- Selektion: Remainder Stochastic Sampling with Replacement, Roulette Wheel Selection oder Stochastic Universal Sampling
- Rekombination: Cycle Crossover oder Order Crossover
- Mutation: Inversion Mutation oder Swap Mutation

Die Reihenfolgerestriktionen werden direkt im genetischen Algorithmus beachtet. Hierbei existieren zwei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit ist die Nutzung eines Bestrafungsfaktors $p>0$. Bei Nichterfüllung von Reihenfolgebeschränkungen verringert dieser Faktor den Fitnesswert der Reihenfolge, sodass die Selektion dieser Reihenfolge verschlechtert wird. Die zweite Möglichkeit, welche im vorliegenden Algorithmus angewendet wird, besteht in der Vermeidung von unzulässigen Auftragsreihenfolgen bei der Erzeugung der Anfangspopulation, bei der

Rekombination und bei der Mutation (Gerdes et al. 2004). Eine generierte Reihenfolge wird nur als valide angesehen, wenn alle Restriktionen erfüllt sind. Für den Fall, dass nicht-valide Reihenfolgen erzeugt werden, werden diese durch valide Reihenfolgen ersetzt. Dies hat den Vorteil, dass der genetische Algorithmus ausschließlich mit validen Auftragsreihenfolgen arbeitet und somit das Ergebnis der Optimierung ebenfalls alle gegebenen Reihenfolgerestriktionen erfüllt.

Die Bewertung einer Reihenfolge erfolgt durch Anwendung der Simulation. Für jede neu bestimmte Reihenfolge wird ein Simulationsexperiment mit dem Simulationsmodell des Montagesystems gestartet, in dem bei Vorliegen von stochastischen Eingangsgrößen mehrere unabhängige Simulationsläufe durchgeführt werden. Eine stochastische Eingangsgröße für ein Montagesystem ist beispielsweise die Montagezeit an einer Station (Miller und Osdel 2005). Beim Vorhandensein stochastischer Ergebnisgrößen wird eine dynamische Konfidenzintervallschätzung, bei gegebenen Konfidenzniveau durchgeführt. Dafür werden mindestens 10 und maximal 50 Simulationsläufe je Simulationsexperiment ausgeführt.

4 Reihenfolgerestriktionen

Eine Beschränkung der Reihenfolge von Fertigungsaufträgen C_r ist definiert durch eine Folge von logischen Ausdrücken BE_r, durch einen Restriktionstyp T_r und durch die Anzahl von Übereinstimmungen m_r, sodass gilt:

$$C_r = (BE_r, T_r, m_r), \forall r = 1,...,R\,. \tag{3}$$

Für die Beschreibung einer Folge von logischen Ausdrücken müssen zunächst Restriktionsvariablen definiert werden. Hierfür wird die Menge der Variantenmerkmale bzw. Features $\bar{F}$; verwendet, die im Simulationsmodell definiert sind und zur Spezifizierung einer Variante genutzt werden.

Dementsprechend gilt für alle Restriktionsvariablen I_q mit $Q \in \mathbb{N}^+$ als Anzahl dieser Variablen:

$$I_q \subseteq \bar{F}, \forall\, q = 1,..., Q\,. \tag{4}$$

Diese Menge aller Variantenmerkmale charakterisiert ebenso alle Fertigungsaufträge J_i, um verschiedene Varianten eines Produkts abzubilden (siehe Gl. 5).

$$J_i \subseteq \bar{F}, \forall i = 1,..., N \tag{5}$$

In Kombination mit den logischen Operatoren ($\wedge,\vee,\neg$), den Klammersymbolen sowie dem Semikolon bilden die Restriktionsvariablen die Grundlage zur Definition eines logischen Ausdrucks E_{rj} ($\forall j = 1,\ldots,M_r$, $\forall r = 1,\ldots,R$), wobei das Semikolon das Ende eines Ausdrucks darstellt. Mehrere solcher Ausdrücke spezifizieren eine Folge BE_r mit $M_r \leq N$, wobei $M_r \in \mathbb{N}^+$ die Anzahl von logischen Ausdrücken in dieser Folge für die Reihenfolgerestriktion C_r ist.

In der vorliegenden Arbeit werden drei Typen von Reihenfolgestriktionen unterschieden:

- *required*: Eine Übereinstimmung der Folge von logischen Ausdrücken muss mindestens einmal in der Auftragsreihenfolge vorhanden sein.
- *prohibited*: Die Folge von logischen Ausdrücken darf nicht in der Auftragsreihenfolge vorkommen.
- *optional*: Nach Übereinstimmung einer bestimmten Anzahl von logischen Ausdrücken $m_r \in \mathbb{N}^+$ mit $m_r < M_r$ für eine Restriktion C_r müssen die nachfolgenden logischen Ausdrücke ebenfalls erfüllt sein.

Demgemäß ist $T_r \in \{\text{required, prohibited, optional}\}$ $(\forall r = 1,\ldots,R)$. Weiterhin wird die Anzahl der Übereinstimmungen m_r wie folgt beschrieben:

$$m_r = \begin{cases} 1, \ldots, M_r - 1, & \text{wenn Typ } T_r \text{ optional ist} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}, \forall r = 1, \ldots, R. \tag{6}$$

Für die Bestimmung, ob eine Reihenfolge Seq_k von Aufträgen eine Restriktion C_r erfüllt, muss die zugehörige Folge von logischen Ausdrücken BE_r gegen jede Teilreihenfolge der Länge M_r überprüft werden. Zur Auswertung eines logischen Ausdrucks für einen Fertigungsauftrag werden zunächst die Restriktionsvariablen des Ausdrucks überprüft. Basierend auf den Variantenmerkmalen ist eine Übereinstimmung einer Restriktionsvariable I_q mit einem Auftrag J_i vorhanden, wenn $I_q \subseteq J_i$. Die Restriktionsvariablen können durch logische Operatoren miteinander verknüpft werden. Hierbei ergibt sich das Ergebnis aus den Ergebnissen der Variablen und deren Verknüpfung durch den Operator. Im Folgenden wird dieses Vorgehen an einem Beispiel erläutert.

Beispiel:

In einem Simulationsmodell sind die Menge der Variantenmerkmale $F;^{-}=\{a,b,c\}$ und fünf Fertigungsaufträge ($J_1=\{a\}$, $J_2=\{a,b\}$, $J_3=\{a\}$, $J_4=\{b\}$, $J_5=\{c\}$) gegeben. Für die Reihenfolge $Seq_1= J_1, J_2, J_3, J_4, J_5$ sind drei Reihenfolgerestriktionen (C_1, C_2, C_3) zu beachten (siehe Gl. 7). Hierfür wurden drei Restriktionsvariablen ($I_1=\{a\}$, $I_2=\{b\}$, $I_3=\{c\}$) definiert.

$$\begin{aligned} C_1 &= (I_1; I_2;, \text{required}, 0) \text{ mit } M_1=2, \\ C_2 &= (I_3; I_1;, \text{prohibited}, 0) \text{ mit } M_2=2, \\ C_3 &= (I_1 \wedge I_2; I_1; I_2;, \text{optional}, 2) \text{ mit } M_3=3. \end{aligned} \tag{7}$$

Die Folge von logischen Ausdrücken ist für die erste Restriktion $BE_1=I_1;I_2;$ und besteht demnach aus zwei logischen Ausdrücken, sodass die Länge $M_1=2$ ist. Der Restriktionstyp von C_1 ist T_1=required mit $m_1=0$. Infolgedessen ist die erste Restriktion erfüllt, wenn mindestens ein Vorkommen von BE_1 in der Sequenz zu finden ist. Der Vergleich beginnt mit dem ersten logischen Ausdruck $E_{11}=I_1;$ und dem ersten Auftrag J_1. Die Auswertung der Restriktionsvariable I_1 ergibt, dass $I_1 \subseteq J_1$ ist. Folglich ist der erste logische Ausdruck für den ersten Fertigungsauftrag erfüllt, sodass der nächste logische Ausdruck $E_{12}=I_2;$ mit dem Auftrag J_2 verglichen wird. Dieser Ausdruck ist ebenso erfüllt, da $I_2 \subseteq J_2$. Demzufolge ist ein Vorkommen von BE_1 in Seq_1 zu finden und die Restriktion C_1 ist nicht verletzt.

Für die Restriktion C_2 ist die Folge $BE_2=I_3;I_1;$ definiert mit der Länge $M_2=2$. Der Typ dieser Restriktion ist T_2=prohibited. Demzufolge ist die Restriktion nicht erfüllt,

wenn eine Übereinstimmung der Folge von logischen Ausdrücken in der Reihenfolge von Fertigungsaufträgen vorhanden ist. Bei der Überprüfung des ersten logischen Ausdrucks $E_{21}=I_3$; mit allen Fertigungsaufträgen ist keine Übereinstimmung vorhanden, da $I_3 \not\subset J_1$, $I_3 \not\subset J_2$, $I_3 \not\subset J_3$, $I_3 \not\subset J_4$ und $I_3 \not\subset J_5$. Demnach ist die Folge von logischen Ausdrücken für die zweite Restriktion nicht in der Sequenz zu finden, sodass diese Restriktion erfüllt ist.

Die Restriktion C_3 besteht aus der Folge von logischen Ausdrücken $BE_3=I_1 \wedge I_2;I_1;I_2$; der Länge $M_3=3$ mit den logischen Ausdrücken $E_{31}=I_1 \wedge I_2;$, $E_{32}=I_1$; und $E_{33}=I_2;$. Der Restriktionstyp von C_3 ist T_3=optional mit $m_3=2$. Dieser Typ von Restriktionen überprüft hierbei die ersten beiden logischen Ausdrücke E_{31} und E_{32}, da $m_3=2$ ist. Sind diese erfüllt, dann muss auch der nachfolgende Ausdruck E_{33} übereinstimmen. In E_{31} sind die Restriktionsvariablen I_1 und I_2 durch den logischen Und-Operator verknüpft, sodass dieser Ausdruck nur wahr ist, wenn I_1 und I_2 erfüllt sind. Dies ist für den Auftrag J_2 gegeben, da $I_1 \subseteq J_2$ und $I_2 \subseteq J_2$. E_{32} ist ebenfalls für den Fertigungsauftrag J_3 erfüllt. Demnach muss E_{33} ebenfalls für den Auftrag J_4 übereinstimmen, damit die Restriktion C_3 nicht verletzt wird. E_{33} ist für den Auftrag J_4 erfüllt. Infolgedessen ist BE_3 in der Sequenz zu finden und die Restriktion ist nicht verletzt.

5 Implementierung in einem generischen Simulationssystem

5.1 Generisches Simulationsmodell eines Montagesystems

Der vorgestellte Lösungsansatz wurde in ein bestehendes IT-System zur Simulation von Montagesystemen integriert. Der zugrundeliegende Modellierungsansatz für solche Montagesysteme ist in Miller und Osdel (2005) beschrieben. In dem zu modellierenden Montagesystem werden verschiedene Varianten eines Produktes mit spezifischen Variantenmerkmalen bzw. Features, abhängig von den Anforderungen des Kunden montiert. Die durchzuführenden Montagearbeiten an einer Station sind dabei abhängig von der Produktvariante und werden als Operationen zusammengefasst. Ausgehend von diesem Ansatz sowie einer Taktzeit, kann die tatsächlich notwendige Bearbeitungszeit für eine Operation von der Taktzeit abweichen und zu zeitlichen Verzögerungen in der Montage führen.

Produkte und Werker im Montagesystem werden als aktive Elemente modelliert, wohingegen Stationen, an denen physisch die Arbeitsschritte vollzogen werden, als passive Entitäten dargestellt werden. Das Simulationssystem selbst ist in SLX implementiert. SLX (Simulation Language with eXtensibility) ist eine, von der Wolverine Software Corporation entwickelte, Programmiersprache zur Entwicklung von diskreten, ereignisgesteuerten Simulationen (Henrikson 2013).

Gleichzeitig wird die Idee der generischen Modellierung eines Simulationsmodells genutzt (Lemessi et al. 2011). Hierbei wird das konzeptuelle Modell in einer Datenbank gespeichert. Mit den dort hinterlegten Informationen werden, basierend auf einer Modellklassen-Bibliothek, beim Start des Simulationsmodells alle notwendigen Simulationsobjekte erstellt und instanziiert. Infolgedessen ist nur ein konzeptuelles Modell zu pflegen.

5.2 Anforderungen der Nutzer

Die potentiellen Nutzer der Optimierung sind Fertigungsplaner, die das Optimierungstool zur Festlegung der täglichen Montagereihenfolge verwenden. Daraus ergibt sich eine wesentliche Anforderung hinsichtlich der Ausführungszeit der Optimierung. Bei stochastischen Eingabegrößen im Simulationsmodell müssen für jede neu ermittelte Reihenfolge von Fertigungsaufträgen mehrere Simulationsläufe durchgeführt werden. Des Weiteren wird der genetische Algorithmus mehrmals ausgeführt. Für die maximale Laufzeit der simulationsbasierten Optimierung wird ein Richtwert von acht Stunden angenommen. Um diesem zeitlichen Limit gerecht zu werden, werden alle Schrittfolgen, die für die Optimierung nicht relevant sind, wie zum Beispiel die Berechnung von unwichtigen Ergebnis- und Animationsdaten, ausgeblendet. Nach einem Simulationslauf werden im Simulationsmodell temporäre Elemente gelöscht und statische Elemente zurückgesetzt sowie die Zufallszahlengeneratoren neu initialisiert. In diesem Zusammenhang ist ebenso das einmalige Einlesen von statischen Eingabedaten für die Optimierung als auch für das Simulationsmodell zu Beginn des Optimierungsprozesses zu erwähnen (Lemessi et al. 2011).

Eine weitere signifikante Anforderung ist eine einfache und intuitive Benutzerführung der Optimierung durch den Anwender auf der operativen Steuerungsebene. Hierfür wurde eine graphische Benutzeroberfläche erstellt, die den Nutzer sowohl bei der Konfiguration und bei der Ausführung der Optimierung, als auch bei der Interpretation und Evaluation der Optimierungsergebnisse unterstützt. Für die Anwender, die keine Kenntnisse über den genetischen Algorithmus besitzen, werden Standardeinstellungen vorgegeben:

- Populationsgröße: 40,
- Anzahl von Generationen: 50,
- Selektionsverfahren: Stochastic Universal Sampling,
- Rekombinationswahrscheinlichkeit: 70%,
- Rekombinationsverfahren: Cycle Crossover,
- Mutationswahrscheinlichkeit: 0,75%,
- Mutationsverfahren: Inversion Mutation.

6 Anwendungsbeispiel

Die Vorteile der Nutzung der simulationsgestützten Reihenfolgeoptimierung werden an dem folgenden Anwendungsfall aufgezeigt. Die Montagelinie besteht aus 17 sequentiellen Stationen mit jeweils identischer Auftragsfolge. Demzufolge kann das Reihenfolgeplanungsproblem als Permutations Flow-Shop-Problem klassifiziert werden. Auf der Montagelinie werden drei verschiedene Produkttypen in unterschiedlichen Funktions- und Designvariationen montiert. Die Montagezeiten für die jeweiligen Produkttypen an den Stationen sind deterministisch. Zusätzlich gegeben ist eine Reihenfolgerestriktion, die untersagt, dass ein bestimmtes Produkt nacheinander gefertigt werden darf. Die vorhandene Ausgangslösung für die Reihenfolge mit 50 Fertigungsaufträgen erfüllt die gegebene Reihenfolgerestriktion. Ein Umfang von 50 Fertigungsaufträgen entspricht dem Montagevolumen von einem Arbeitstag. Das angestrebte Ziel der Optimierung besteht in dem Finden einer

besseren Reihenfolge, hinsichtlich der Reduzierung der Zykluszeit für die 50 Aufträge.

Für das Permutations Flow-Shop-Problem mit N Fertigungsaufträgen existieren N! mögliche Auftragsfolgen (Kiener 2006; Zahn und Schmid 1996). Dementsprechend besteht der Suchraum für eine Reihenfolge mit 50 Aufträgen aus annähernd $3{,}04 \cdot 10^{64}$ potenziellen Lösungskandidaten, bei Vernachlässigung der Reihenfolgerestriktion.

Bei Anwendung der Standardeinstellung für das Optimierungstool wurde bei einer Startreihenfolge als Ausganglösung mit einer Zykluszeit von 1349 Minuten eine bessere Reihenfolge mit einer Zykluszeit von 1314 Minuten gefunden. Infolgedessen wurde eine Verbesserung der Zykluszeit um 35 Minuten erzielt. Der Verlauf der Optimierung ist in Abbildung 2 veranschaulicht. Drei Optimierungsläufe wurden durchgeführt. Mit den Standardeinstellungen wurden 798 Reihenfolgen untersucht bei einer Gesamtrechenzeit von 66 Minuten.

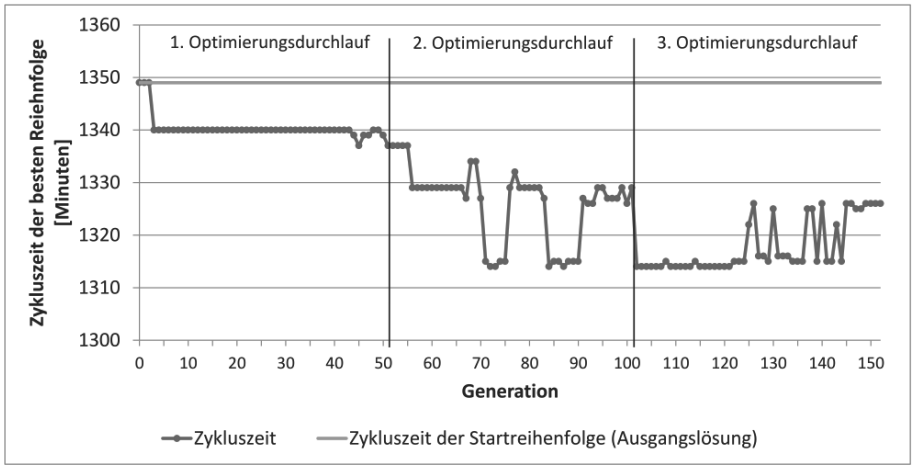


Abbildung 2: *Optimierungsverlauf*

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag erläutert einen simulationsbasierten Optimierungsansatz für das Flow-Shop-Problem der Reihenfolgeplanung von Fertigungsaufträgen in Montagesystemen. Dabei wird der genetische Algorithmus mehrmals ausgeführt. Neue Auftragsreihenfolgen werden durch Anwendung dieses Algorithmus generiert. Des Weiteren werden Reihenfolgebeschränkungen berücksichtigt, die mittels boolescher Algebra definiert werden. Der Optimierungsalgorithmus wurde in ein bestehendes Simulationsmodell für Montagesysteme integriert und mit einer graphischen Benutzeroberfläche zur Anwenderunterstützung verknüpft. Weiterhin wird an einem Anwendungsbeispiel die erreichte Verbesserung der Reihenfolge aufgezeigt. Der vorgestellte Ansatz ist konzeptuell gesehen nicht auf die simulationsbasierte Reihenfolgeplanung von Fertigungsaufträgen für Montagesysteme beschränkt.

Weiterführende Arbeiten fokussieren die parallele Ausführung von Simulationsläufen, um die Laufzeit der Optimierung zu reduzieren. Denkbar ist ebenfalls die Anwendung anderer Optimierungsziele, auch im Sinne einer multikriteriellen Optimierung.

Literatur

Bukchin, J.; Dar-El, E. M.; Rubinovitz, J.: Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. In: Computers and Industrial Engineering (2002) 4, S. 405-421.

Chen, C.-L.; Vempati, V. S.; Aljaber Nasser: An application of genetic algorithms for the flow shop problems. In: European Journal of Operational Research (1995) 2, S. 389-396.

Gerdes, I.; Klawonn, F.; Kruse, R.: Evolutionäre Algorithmen. Genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen. Wiesbaden: Vieweg 2004.

Henrikson, J. O.: Wolverine Web. http://www.wolverinesoftware.com/, 30.04.2013.

Iltzsche, L.; Schmidt, P.-M.; Völker, S.: Simulationsbasierte Optimierung der Einsteuerungsreihenfolge für die Automobil-Endmontage. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Heidelberg: Springer 2011, S. 117-132.

Jeffcoat, D. E.; Bulfin, R. L.: Simulated annealing for resource-constrained scheduling. In: European Journal of Operational Research (1993) 1, S. 43-51.

Jones, R. E.; Wilson, R. H.: A survey of constraints in automated assembly planning. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings, 1996, S. 1525-1532.

Jones, R. E.; Wilson, R. H.; Calton, T. L.: Constraint-Based Interactive Assembly Planning. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings, 1997, S. 913-920.

Kiener, S.: Produktions-Management. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. München, Oldenbourg 2006.

Lackes, R.; Awiszus, E.: Considering Complex Sequence Constraints in Production Scheduling – Results of a Practical Implementation in a German Trailer Company. In: International Proceedings of Economics Developement & Research, 2012, S. 32-37.

Lemessi, M.; Schulze, T.; Rehbein, S.: Simulation-based Optimization of Paint Shops. In: Jain, S.; Creasey, R. R.; Himmelspach, J.; White, K. P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, S. 2351-2362.

Mattfeld, D. C.; Bierwirth, C.: An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives. In: European Journal of Operational Research (2004) 3, S. 616-630.

Miller, T. G.; van Osdel, N.: Modeling Methods for Lean Assembly Systems Using SLX. In: Schulze, T.; Horton, G.; Preim, B.; Schlechtweg, S. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2005. Proceedings der Tagung "Simulation und Visualisierung 2005" am Institut für Simulation und Graphik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg am 3. und 4. März 2005, 2005, S. 87-99.

Pinedo, M.: Scheduling. Theory, algorithms, and systems. 4. Auflage, New York: Springer 2012.

Rotondo, A.; Geraghty, J.; Young, P.: Using simulation and hybrid sequencing optimization for makespan reduction at a wet tool. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 2012.

Völker, S.; Schmidt, P.-M.: Simulationsbasierte Optimierung von Produktions- und Logistiksystemen mit Tecnomatix Plant Simulation. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010, S. 93-100.

Yasin, A.; Puteh, N.; Daud, R.; Omar, M.; Syed-Abdullah S. L.: Product assembly sequence optimization based on genetic algorithm. In: International Journal on Computer Science and Engineering (2010) 2, S. 3065-3070.

Zahn, E.; Schmid, U.: Produktionswirtschaft I. Grundlagen und operatives Produktionsmanagement. Stuttgart, Lucius und Lucius 1996.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Systemische Fertigungsprozessmodellierung und -optimierung mit integrierter Simulation

Systemic manufacturing process modelling and optimization with integrated simulation

Volker Grienitz, Michael Hausicke, Stefan Görzel, Universität Siegen, Siegen (Germany), volker.grienitz@uni-siegen.de, michael.hausicke@uni-siegen.de, stefan.goerzel@uni-siegen.de

Abstract: GraFem is a functional and graphical oriented modelling method to analyse and describe manufacturing processes in a comprehensive way. One of the main targets is to reduce the complexity of a manufacturing process to a manageable degree. This is possible by focusing on a defined process target and its modelling. The presented paper gives a detailed overview to the systematic process modelling with "GraFem" and the possibility of improvement and optimization with integrated simulation. After a short introduction concerning the need and the complexity of simulation, a brief overview of existing (semi-)automated modelling methods is given. It is followed by an introduction in the functionally orientated modelling method GraFem and a detailed description of the integrated simulation with the help of an example. In conclusion, a summary and an outlook of future simulation potential are given.

1 Einleitung

In vielen Anwendungsbereichen von produzierenden Unternehmen hat sich die Materialflusssimulation zu einem etablierten Werkzeug zur Entscheidungsfindung und -unterstützung entwickelt (Acél 1996; Wenzel et al. 2008; Müller-Sommer und Straßburger 2010; März und Weigert 2011). In der Regel ist mit dem Einsatz einer Simulation allerdings ein erheblicher Aufwand verbunden (Müller-Sommer und Straßburger 2010). Allein die „Datenerfassung" und „Modellgestaltung" sind mit Abstand die beiden umfangreichsten Aufgabenschritte und machen zusammen über 50 % des gesamten Zeitaufwands aus (Kaul und Ulbrich 2008; Müller-Sommer und Straßburger 2010; Schumacher und Wenzel 2000). Ursache für den hohen Aufwand sind die zeitintensiven und komplexen Tätigkeiten dieser beiden Phasen.

Der Aufwand für die Datenerfassung wird sehr häufig unterschätzt. Dies ist oft darauf zurückzuführen, dass i.d.R. zwar viele Daten und Informationen vorliegen, diese aber nicht primär für die jeweilige Aufgabenstellung erhoben worden sind.

Das führt dazu, dass diese Daten in einem Prüfschritt auf ihre Verwendbarkeit hin untersucht werden müssen. Darüber hinaus müssen meist immer zusätzliche relevante Daten erhoben und vorhandene Datensätze erweitert werden (Wenzel et al. 2008).

Für den hohen Aufwand bei der „Modellgestaltung“ ist die zeitintensive Implementierung des realen Systems in die Simulationssoftware verantwortlich. Dabei erfordert die Erstellung des Simulationsmodells ein hohes Expertenwissen und stellt an den Modellierer hohe Anforderungen, da hier z.B. alle relevanten Systemeigenschaften herausgearbeitet werden müssen. Wird das Modell dabei zu detailliert beschrieben, so steigt der benötigte Zeitaufwand enorm an und das Modell wird zu umfangreich. Das heißt, dass der Detaillierungsgrad die Komplexität des Modells und den Aufwand bei der Modellgestaltung bestimmt (Kühn 2006; Wenzel 2000; Wenzel et al. 2008).

Um dem entgegen zu wirken, werden in der Wissenschaft seit einiger Zeit Ansätze erarbeitet, die Simulationen für jede Unternehmensgröße zugänglich machen. Diese sollen eine effizientere und leichtere Erstellung der Simulationsmodelle ermöglichen (Straßburger et al. 2010). Dieser Beitrag zeigt einen Ansatz, wie eine Simulationsstudie auf Basis einer GraFem-Modellierung teil- bzw. vollautomatisiert durchgeführt werden kann.

2 (Teil-)automatisierte Simulation

In der Elektrotechnik oder Informatik werden bereits einige Modellierungsmethoden beschrieben, die eine automatisierte bzw. teilautomatisierte Simulation von modellierten Modellen erlauben (Schönherr und Rose 2010). Dazu zählen unter anderem die Methoden UML (Unified Modelling Language) sowie Petri-Netze (Barbarisi und Vecchio 2005; Priese und Wimmel 2008). In der Informatik ist die automatisierte Codegenerierung mit Hilfe dieser Methoden seit einiger Zeit verbreitet (vgl. Fowler 2003). Diese Ansätze sind aber in der Regel ungeeignet, um Fertigungssysteme umfassend, systematisch und funktional zu modellieren.

Aufbauend auf der Unified Modelling Language wurde von der Object Management Group die Systems Modelling Language (SysML) entwickelt und 2006 veröffentlicht. SysML legt den Fokus weniger auf die Softwareentwicklung, sondern ist für die Modellierung von allgemeinen technischen Systemen zuständig (Alt 2012). Diese Modelle lassen sich auch simulieren, allerdings stellt die abstrakte Sichtweise und die große Anzahl von Modellierungsmöglichkeiten für Ingenieure ein Hindernis für die effektive Anwendung von SysML dar (Schönherr und Rose 2010).

Aktuelle Forschungen zum Thema Simulation sind vor allem im Bereich der Modellierung und Datenbereitstellung für Simulationstools zu finden. Ein Beispiel ist das Core Manufacturing Simulation Data Information Model (CMSD), das darauf abzielt, die gleichen Datenstrukturen für die Simulation als auch für den realen Fertigungsablauf zu nutzen (Bergmann et al. 2010). Diese in dem Datenformat enthaltenen Daten, wie beispielsweise Layout- und strukturbezogene Informationen wie auch Systemlast- oder Steuerdaten, können beispielsweise in Plant Simulation verarbeitet werden. Ein weiteres Beispiel dafür ist das etwas ältere Simulation Data Exchange (SDX) Format, welches allerdings auf Layoutinformationen beschränkt

ist. Diese Informationen können mit simulationsrelevanten Parametern versehen werden. Das SDX-Format ist im Gegensatz zum CMSD proprietär, was einen Nachteil bzgl. der Weiterentwicklung darstellt (Straßburger et al. 2010).

3 Grafische Fertigungsmodellierung – GraFem

Die von Grienitz entwickelte grafische und funktional orientierte Modellierungsmethode „GraFem“ stellt ein Werkzeug zur Beschreibung von Produktions- und Fertigungssystemen dar. Sie wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Flusssysteme eines Wertschöpfungssystems umfangreich analysieren zu können. Diese Flusssysteme betreffen nach Schenk und Wirth (2004) vor allem den Energie-, Informations- und Materialfluss. Diese werden zusammen mit den Wertschöpfungsverlusten in einer Grafik zusammengefasst (vgl. Abb. 1), um sie darauf aufbauend umfangreich mit Hilfe von Partialmodellen analysieren zu können (Grienitz und Hausicke 2012).

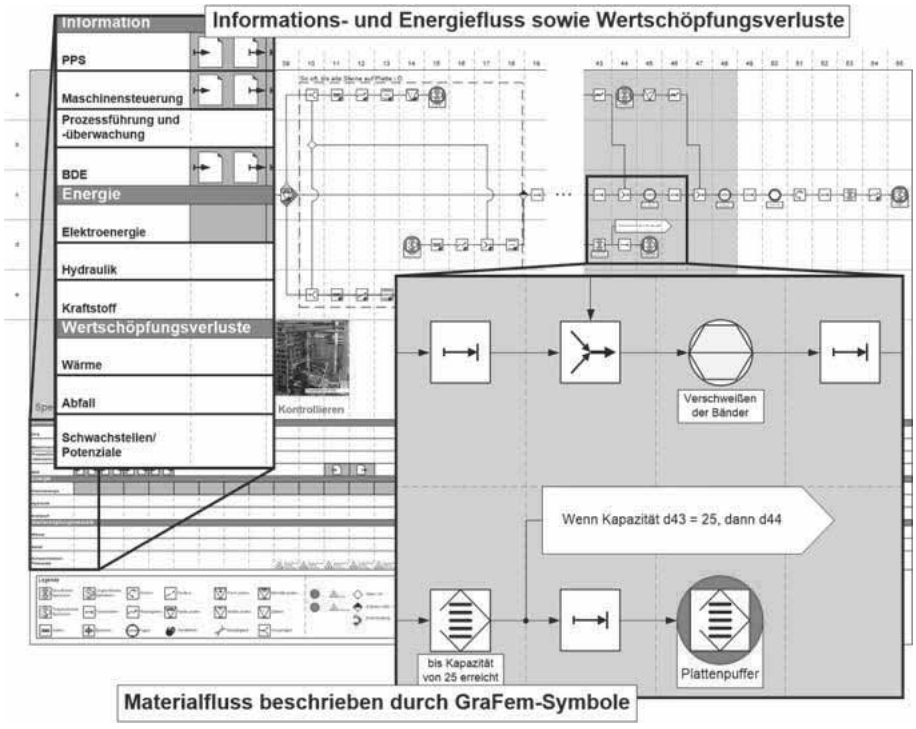


Abbildung 1: *Ausschnitt der GraFem-Tapete zur Pflastersteinfertigung*

GraFem basiert im Wesentlichen auf drei unterschiedlichen Ansätzen. Zum einen auf dem Ansatz von Košturiak und Gregor (1995), die Produktionssysteme mit der Hilfe von Teilsystemen und deren dynamischen-, stationären- sowie Schnittstellenelementen beschreiben. Der zweite Ansatz stellt die von Wirth (Schenk und Wirth 2004) aufgestellte Flusssystemtheorie dar. Sie unterstellt, dass sich alle Prozessfolgen innerhalb eines Produktionssystems bzw. einer Fabrik als Flüsse und

Flusssysteme aufgefasst werden können (Stoff-/Material-, Informations- oder Energiefluss). Ebenso lassen sich die zur Ausführung einer Prozessaufgabe erforderlichen Aufgaben zum Zweck der Beschreibung von Flüssen in die Grundfunktionen Transformieren, Speichern und Transportieren gliedern. Die VDI Richtlinie 2860 stellt als dritter Ansatz eine wesentliche Basis der Methode GraFem dar (Verein Deutscher Ingenieure 1990). Sie liefert klare Einordnungen, Abgrenzungen und Definitionen des Handhabens und seiner Teilfunktionen sowie die dazugehörigen Symbole, die zur Visualisierung verwendet werden. Diese können durch eigene Symbole ergänzt werden.

Mittels der Methode GraFem und der Vorgehensweise (vgl. Abb. 2) können Prozesse in einer für die Zielgruppe verständlichen Art und Weise visualisiert werden (vgl. Abb. 1). Somit kann ein ganzheitliches Verständnis über das Produktionssystem sowie dessen Schwachstellen und Potentiale erlangt werden.

Dafür wurden für die Methode GraFem sogenannte Partialmodelle entwickelt, die den Anwender bei einer nachhaltigen und erfolgreichen Modellierung sowie bei der Optimierung und Verbesserung von Produktions- bzw. Fertigungssystemen unterstützen sollen. Ein Beispiel stellt das Energiemodell dar, das auf die Art und Menge der verwendeten Energieform (beispielsweise elektrische Energie, Druckluft) eingeht. Weitere wichtige Partialmodelle stellen das Wertschöpfungsmodell, das die Potentiale und Schwachstellen der Prozesse herausstellt, sowie das Informationsmodell mit Details zur Betriebsdatenerfassung oder der Maschinensteuerung bzw. PPS dar.

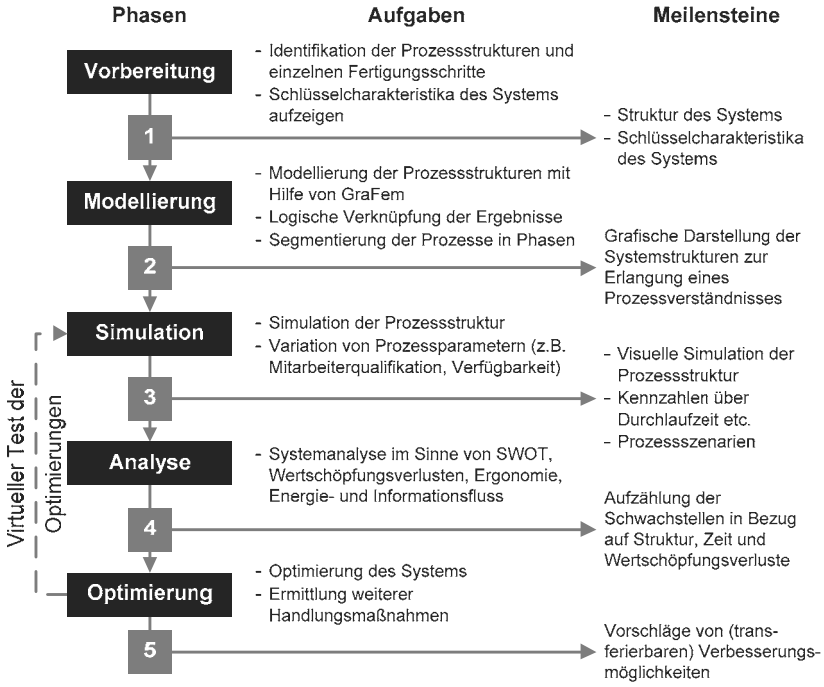


Abbildung 2: *Erweitertes GraFem-Phasenmodell*

Standardgemäß wird die Optimierung bzw. Visualisierung eines Fertigungsprozesses mit der Methode GraFem in vier Phasen durchgeführt (Grienitz et al. 2010). Die im Folgenden beschriebene Integration der Simulation führt zu einer Anpassung des GraFem-Phasenmodells. Dies erfolgt, indem die Phase der Simulation darin integriert wird (vgl. Abb. 2).

4 Simulation als Partialmodel

Die detaillierte Analyse eines Systems kann allerdings aufgrund seiner Vielzahl von Attributen und Abhängigkeiten schnell zu einem Verlust der Übersichtlichkeit und Anstieg der Komplexität führen (Dangelmaier 2003). Die iterative Analyse und der Vergleich verschiedener Varianten und Attributkonstellationen sind oftmals mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden.

Um dem entgegen zu kommen ist die Simulation als Partialmodell in GraFem integriert worden. Durch die Simulation wird die bisweilen qualitative Analyse mit Hilfe von beispielsweise Lean Methoden durch die quantitative Analyse z.B. in Form einer Materialflusssimulation oder der Berechnung der optimalen Losgrößen, Taktzeiten etc. erweitert. Das bedeutet, dass eine Verbesserung des Produktionssystems z.B. durch eine bessere Abstimmung der einzelnen Prozessschritte aufeinander erreicht werden kann. Die Integration fokussiert dabei nicht nur die Verbesserung, sondern ebenfalls die Planung von Produktionssystemen.

Daneben wird die Planung, Analyse und Optimierung durch die Bildung von Fertigungs-, Produktionssystem- oder Systemlastszenarien (Kühn 2006) vereinfacht. Die Fertigungssystemszenarien bieten dabei die Möglichkeit, den Einsatz alternativer Fertigungstechnologien und Produktionssystemszenarien die Anwendung unterschiedlicher Methoden (beispielsweise Einlagerungsstrategien) zu evaluieren. Durch die Systemlastszenarien kann das Systemverhalten durch unterschiedliche Auslastungsgrade (hoch, mittel und gering) geprüft werden.

Um eine effiziente und somit wirtschaftliche Integration der Simulation als Partialmodell zu erreichen, sollte der Aufwand für die Datenbeschaffung und Modellgenerierung reduziert werden. Der Ansatz der teil- bzw. vollautomatisierten Simulation bietet an dieser Stelle eine vielversprechende Lösung. Die Herausforderung dabei ist, auf Grundlage einer Datenbasis ein Simulationsmodell automatisiert zu erstellen und mit allen notwendigen Parametern zu konfigurieren. Darüber hinaus sollte ein gewisser Freiheitsgrad gegeben sein, um das entsprechende Simulationsmodell im Nachhinein ggf. manuell noch anpassen bzw. weiter detaillieren zu können.

Der Einsatz von GraFem mit Simulation erfolgt in fünf Phasen (vgl. Abb. 2). Diese werden im Folgenden anhand eines Beispiels aus einer trockenseitigen Pflastersteinfertigung erläutert. Das Beispiel betrifft die Entnahme der abgebundenen Pflastersteinlagen aus Hochregallager, das weitere Handling, die Palettierung durch einen Roboter, Verpackung sowie den Abtransport ins Ausgangslager. Die sog. „Frischseite“ (Fertigung vor dem Trocknungsprozess) ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

4.1 Phase 1 „Vorbereitung“

Zu Beginn des GraFem-Einsatzes erfolgt die Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes sowie des Ziels. In dem hier gewählten Anwendungsbeispiel lag der Fokus auf der technologischen Optimierung und Verbesserung der trockenseitigen Pflastersteinfertigung. Dies beinhaltete neben der Identifizierung alternativer Technologien auch die Reduzierung von Verschwendungen durch bspw. Stillstandszeiten. Um diese Ziele erreichen zu können, sind in dieser Phase die einzelnen Prozessschritte mit ihren Schlüsselcharakteristika zu identifizieren. Zu den Schlüsselcharakteristika zählen neben den benötigten Informationen und Energien auch die Kapazitäten, Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten. Zur Bestimmung dieser Informationen kommt das GraFem-Workshop-Set zum Einsatz. Als Ergebnis entsteht die Datenbasis für das Simulationsmodells sowie für die darauffolgende Erstellung der GraFem-Tapete.

In dem hier gewählten Anwendungsbeispiel wurden mittels des Workshop-Sets 89 einzelne Prozessschritte und 22 relevante Technologien in einer Expertenrunde identifiziert. Darüber hinaus wurden bereits erste Schwachstellen herausgearbeitet. Dazu zählten beispielsweise regelmäßige Produktionsstopps aufgrund des überfüllten Puffers, der die Holzplattenstapel lagert. Eine weitere Schwachstelle war eine auf den ersten Blick nicht notwendige Drehung des Roboterarms, um die Europaletten richtig in der Anlage zu positionieren.

4.2 Phase 2 „Modellierung“

Aufbauend auf der Sammlung aller notwendigen bzw. relevanten Daten wird in dieser Phase die GraFem-Tapete erzeugt. Sie ist eine visuelle Aufbereitung, bei der alle gewonnen Daten in einer Grafik zusammengefasst werden (vgl. Abb. 1). Die Prozessstruktur wird mittels der GraFem-Symbole modelliert und anschließend logisch verknüpft. In der GraFem-Tapete sind die einzelnen Prozessschritte vergleichbar einem Schachbrett angeordnet. Durch eine solche Schachbrettstruktur wird eine eindeutige Zuordnung von Informationen auf den sogenannten Schwimmbahnen ermöglicht. Bei der Modellierung werden nach dem Ansatz von Wiendahl die wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Funktionen berücksichtigt, wobei letztere weiter in Supportfunktionen und Koordinationsfunktionen unterschieden werden. Die Supportfunktionen (bspw. Rüstvorgänge) sind für die Wertschöpfung von elementarer Bedeutung, wohingegen die Koordinationsfunktionen keinen direkten Bezug zur Wertschöpfung aufweisen (Lotter und Wiendahl 2006).

Zusätzlich zur Modellierung der Prozessstruktur erfolgt eine Segmentierung einzelner Prozessschritte zu Gruppen und ein Hinzufügen von Fotos, um Elemente des Produktionsprozesses zum besseren Verständnis veranschaulichen zu können. Neben der Abbildung der Prozessstruktur erfolgt eine Zuordnung relevanter Daten, wie beispielsweise des Zeitbedarfs, der Kapazität, des Informations- und Energieflusses sowie der Wertschöpfungsverluste in den Schwimmbahnen unterhalb der GraFem-Symbole. Die visuelle Aufbereitung erfolgt dabei unter Zuhilfenahme von Visualisierungs-Tools wie z.B. Microsoft® Visio® (Grienitz und Hausicke 2012).

4.3 Phase 3 „Simulation“

In dieser Phase geht es um die eigentliche Simulation des Prozesses bzw. des Materialflusses. Dabei kann zwischen der teilautomatisierten und der automatisierten Simulation unterschieden werden. Der Unterschied liegt darin, dass bei der automatisierten Simulation das Plant Simulation Referenzmodell alle anstehenden Aufgaben selbstständig abarbeitet. Das heißt, es importiert die Eingangsdaten, modelliert das Simulationsmodell, simuliert und überträgt die Ausgangsdaten. Der Anwender hat somit keine Möglichkeit in den Prozess einzugreifen. Bei der teilautomatisierten Simulation hingegen hat der Anwender die Möglichkeit nach jedem Schritt in den Simulationsprozess einzugreifen, um ggf. Anpassungen oder Detaillierungen vornehmen zu können.

Bis auf die Informations- und Energieschwimmbahnen sowie die integrierten Bilder besitzt das Simulationsmodell den Aufbau und das Aussehen wie die GraFem-Tapete. Die Simulationselemente weisen dazu dieselbe Symbolik der GraFem-Symbole auf und das Simulationsmodell besitzt die gleiche Schachbrettstruktur im Hintergrund wie die GraFem-Tapete. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anwender bei einer notwendigen Anpassung oder aber auch bei der Analyse eine direkte Verbindung zwischen Tapete und Simulationsmodell herstellen können.

In einer spezifischen Plant-Simulation-Klassenbibliothek sind die einzelnen GraFem-Symbole als Simulationselemente hinterlegt. Ein Fertigungsschritt (z.B. „Fügen“) kann durch alle erforderlichen Parameter, die für die Simulation des Fertigungsschrittes erforderlich sind, wie z.B. Bearbeitungs- oder Rüstzeit, konfiguriert werden. Während der Simulationsmodellerzeugung werden dann die einzelnen Simulationselemente aus der Klassenbibliothek heraus erzeugt, positioniert und mit den notwendigen Parametern aus der Datenbasis konfiguriert.

Sobald das Simulationsmodell erfolgreich erzeugt wurde, wird der Materialfluss darin simuliert. Währenddessen werden in spezifischen Tabellen Daten über das Systemverhalten gesammelt und am Ende zu Kennzahlen zusammengefasst. Zu diesen Daten zählen beispielsweise wie sich Pufferbestände über die Zeit entwickeln, welche Prozessschritte eine hohe Frequentierung besitzen oder welche Schritte große Wartezeiten aufweisen.

Am Ende der Simulation werden die Daten aus den Tabellen, die sog. Simulationsausgangsdaten, an die Datenbasis übermittelt und dort automatisch zu einem Bericht aufbereitet. Dieser enthält zusätzlich zu den statistischen Kennzahlen auch beispielsweise ABC-Analysen. Neben der GraFem-Tapete sind die Erkenntnisse aus der Simulation eine weitere Grundlage für die darauf aufbauende Analyse.

4.4 Phase 4 „Analyse“

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den vorhergegangenen Phasen wird die Analyse durchgeführt. Diese beinhaltet die qualitative sowie quantitative Analyse. In der qualitativen Analyse kommen neben Methoden des Lean Managements auch u.a. SWOT-Analysen zum Einsatz, um beispielsweise Schwachstellen in Bezug auf die Wertschöpfung, die Ergonomie oder die Flusssysteme zu identifizieren (Grienitz und Hausicke 2012). Als Grundlage dafür dient weitestgehend die erstellte GraFem-Tapete.

Die quantitative Analyse erfolgt auf Basis der Simulationsausgangsdaten. Dazu wird das System z.B. auf Wertschöpfungsverluste durch sog. „Bottlenecks“, überdimensionierte Lager bzw. Puffer oder nicht optimal ausgelegte Losgrößen untersucht. Das Ziel dieser Phase ist es, eine Grundlage für die Entwicklung effizienter Optimierungsmaßnahmen zu erarbeiten.

Für eine fundierte Analyse werden während der Simulation u.a. unterschiedliche Systemlastszenarien simuliert. Das heißt, die Simulationsläufe werden mit unterschiedlich großen Stückzahlen gefahren. Durch diese unterschiedlichen Belastungen des Simulationsmodells werden beispielsweise Schwachstellen in der Dimensionierung von Puffern und Lagern im Sinne von Kapazitätsanalysen, in der Abstimmung einzelner Prozessschritte aufeinander, in den Taktzeiten oder in der Losgrößenbestimmung aufgezeigt. Unterstützt werden diese Punkte durch mathematische Methoden, mit denen bspw. die optimale Losgröße, Anzahl der Kanban oder optimale Taktzeit berechnet werden kann. Neben diesen gibt es noch zahlreiche weitere Möglichkeiten, um die Simulationsergebnisse auszuwerten und zu analysieren (Vergleich hierzu u.a. (Fritz 2007; Kühn 2006; März et al. 2011)). Zur Abstellung dieser Schwachstellen werden in der anschließenden Optimierungsphase Handlungsmaßnahmen herausgearbeitet.

Die Auswertung der Simulation der Pflastersteinfertigung zeigte, dass die anfänglichen Annahmen richtig waren. Je nach Produktionsprogramm entstanden Produktionsstopps aufgrund fehlender Kapazitäten im Puffer für die Holzplatten. Darüber hinaus bestätigte sie auch, dass je nach Produktionsprogramm ein Zeitverlust durch die Roboterarmdrehung entstanden ist, die für eine richtige Positionierung der Paletten notwendig war. Technologieseitig zeigte sich, dass durch den Einsatz des Roboters die Anlage bereits auf einem aktuellen Stand war. Durch Gespräche mit Experten der Anlagenbauer wurde allerdings ersichtlich, das bereits Bestrebungen dahingehend laufen, die hydraulische Lösung der Steinlage von Holzplatten durch eine elektrische zu substituieren. Auch die zum Zeitpunkt des Projektes durchgeführte Qualitätsprüfung durch Menschenhand kann stellenweise durch eine kameragestützte Prüfung optimiert werden.

4.5 Phase 5 „Optimierung“

Auf Basis der Analyse werden in der letzten Phase Optimierungsmaßnahmen entwickelt. Durch die Realisierung dieser Maßnahmen, soll die Wettbewerbsfähigkeit erhöht werden, indem u.a. aktuelle und zukünftige Marktanforderungen befriedigt und Wertschöpfungsverluste reduziert werden.

Im Sinne der virtuellen Absicherung können die jeweiligen entwickelten Maßnahmen virtuell getestet werden, bevor diese in die Realität umgesetzt werden. Das Ganze erfolgt dabei im Rahmen eines PDCA (Plan, Do, Check, Act) Zyklus (Brunner und Wagner 2008). Das heißt, dass auf Basis der Analyse Optimierungen entwickelt (Plan) und anschließend durch die Simulation (Do) analysiert (Check) werden. Dazu müssen diese Optimierungen in das Simulationsmodell überführt werden. Dies erfolgt indem sie in Form von veränderten Parametern in die Datenbasis eingepflegt werden. Beispiele für diese Veränderungen wären die Ergebnisse der mathematischen Analyse, wie die optimale Losgröße, die berechnete Anzahl der Kanban etc. Im Falle von zufriedenstellenden Ergebnissen können die Optimierungen am System in die Realität umgesetzt werden (Act). Sollte sich

während der Überprüfung herausstellen, dass die Optimierungsmaßnahmen keinen Nutzen für das reale System bringen, können diese sogleich verworfen werden.

Um den identifizierten Produktionsstopps in der Pflastersteinfertigung zu begegnen, reichte bereits die Entfernung von zwei Einheiten an Holzplatten (2 x 16 Stück) aus dem Puffer. Dies führte dazu, dass die Anlage ungehindert weiter produzieren kann, ohne darauf warten zu müssen, dass die nassseitige Pflastersteinfertigung eine Einheit Holzplatten aus dem Puffer entnimmt. Zur Beseitigung der unnötigen Roboterarmdrehung reichte bereits eine 90°-Drehung des Palettenmagazins. Neben diesen wurden weitere kleine Optimierungen vorgenommen wie beispielsweise die Anpassung der Taktzeiten oder die Verpackung des Steinpaketes.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration der Simulation als Partialmodell stellt eine wesentliche Weiterentwicklung von GraFem dar. Die Möglichkeit, dadurch Produktionssysteme nicht nur auf qualitative (z.B. Lean Methoden) sondern auch auf quantitative (z.B. Simulationen) Weise analysieren zu können, führt zu einem tiefgreifenden Prozessverständnis. Im Sinne der Digitalen Fabrik ermöglicht der vorgestellte Ansatz einerseits die Planung und andererseits die Optimierung von Produktionssystemen. Durch die digitalen Modelle wird beispielsweise eine frühzeitige virtuelle Absicherung von Planungsergebnissen sichergestellt und der Prozess der iterativen Erstellung und Bewertung verschiedener Prozessszenarien vereinfacht.

Die zukünftige Forschung fokussiert u.a. die Umsetzung zusätzlicher Funktionen und Analyse-Methoden im Referenzmodell der Simulation. Des Weiteren wird die stärkere Verzahnung aller Partialmodelle mit dem Partialmodell Simulation verfolgt.

Literatur

Acél, P.-P.: Simulieren geht über Probieren – aber nicht ohne studieren! In: Betriebswissenschaft und Innovation, BWI ETH: Zürich 1996.

Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. Hanser: München 2012.

Barbarisi, O.; Vecchio, C. d.: UML Simulation Model for Hybrid Manufacturing Systems. In: Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation. Limassol, Cyprus, June 27-29, 2005, S. 358-363.

Bergmann, S.; Fiedler, A.; Straßburger, S.: Generierung und Integration von Simulationsmodellen unter Verwendung des Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Information Model. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 461-468.

Brunner, F. J.; Wagner, Karl W.: Qualitätsmanagement – Leitfaden für Studium und Praxis. Hanser: München 2008.

Dangelmaier, W.: Produktion und Information: System und Modell. Springer: München 2003.

Fowler, M.: UML konzentriert: Eine kompakte Einführung in die Standardobjektmodellierungssprache. Heidelberg: Pearson Education 2003.

Fritz, J.: Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik. Saarbrücken: Dissertation, Universität des Saarlandes 2007.

Grienitz, V.; Baldus, S.; Schmidt, A.-M: Funktionale Modellierung für Produktionssysteme. Optimierung von Produktionssystemen mit Hilfe der Methode GraFem. In: ZWF – Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 105, Heftnummer 11, 2010, S. 984-990.

Grienitz, V.; Hausicke, M.: Development of Process Innovations with „GraFem“. In: Lang, R.; Müller, E. (Hrsg.): Proceedings. Methods, strategy, cooperation; Chemnitz, Germany, 29-30 March 2012, S. 142-155.

Kaul, R.; Ulbrich, A.: 17. Deutscher Materialfluss-Kongress: Workshop Ablaufsimulation – Digitale Systemoptimierung. Garching 2008.

Košturiak, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Berlin, Heidelberg: Springer 1995.

Kühn, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Hanser: München 2006.

Lotter, B.; Wiendahl, H.P.: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Springer: Berlin 2006.

März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Springer: Berlin 2011.

März, L.; Weigert, G.: Simulationsgestützte Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Springer: Berlin 2011, S. 3-12.

Müller-Sommer, H.; Straßburger, S.: Methoden zur Plausibilisierung von Eingangsdaten für Belieferungssimulationen in Logistik-Planungssystemen der Digitalen Fabrik. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.) Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 61-68.

Priese, L.; Wimmel, H.: Petri-Netze. 2. Auflage, Berlin, Springer, 2008.

Straßburger, S.; Bergmann, S.; Müller-Sommer, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.) Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 37-44.

Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer 2004.

Schönherr, O.; Rose, O.: Modellierung mit SysML zur Abbildung von Produktionsprozessen. In: Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.) Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 453-460.

Schumacher, R.; Wenzel, S.: Der Modellbildungsprozeß in der Simulation. In: Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Society for Computer Simulation 2000, S. 5-11.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI Richtlinie 2860 Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.

Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. SCS-Europe BVBA: Ghent, Belgien 2000.

Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualtitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Springer: Heidelberg 2008.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Fabriksimulation als Schlüssel zur Beherrschung der Komplexität in einer hochautomatisierten Halbleiterfertigungslinie

Fab Simulation - the key to master the complexities in a highly automated semiconductor production line

Wolfgang Scholl, Infineon Technologies Dresden GmbH, Dresden (Germany),
wolfgang.scholl@infineon.com

Abstract: Infineon produces customer-specific logic chips in the high-automated Dresden fab. High complexity, caused by the variety of technologies and products with 400 … 800 steps and with a lot of reentrant process flows, has to be mastered ensuring delivery commitments with short, controllable and predictable cycle times. On the other hand, a semiconductor fab with about 1000 very expensive machines has to be operated in a high efficient mode. These facts substantiate the need for simulation methods on all levels of the production process. In this paper the main application discrete-event fab simulation is described. This method has established to a frequently used decision-making method. With the help of typical use cases the benefits of long-term fab simulation for dynamic planning and short-term simulation for production control issues are illustrated.

1 Einleitung

Infineon betreibt in Dresden eine moderne, hochautomatisierte Fertigungslinie, in der Logikschaltkreise vorrangig für die Automobilindustrie und Sicherheitsanwendungen produziert werden. Die hohe Komplexität zeigt sich nicht nur in der hohen Produktvielfalt, im breiten Technologiespektrum mit kritischen Strukturgrößen von 200nm bis in den Bereich von 90nm und der Länge der Arbeitspläne mit bis zu 800 Prozessschritten. Der Halbleiterfertigungsprozess ist im krassen Gegensatz zu einer Fließfertigung von Prozessschleifen geprägt, d.h. bestimmte Anlagengruppen werden 20…30mal in einem Arbeitsplan durchlaufen. Typisch für derartige Systeme ist ein Aufschaukeln nach Fertigungsstörungen über mehrere Wochen, da Bestandsberge Kapazitätsengstellen mehrfach tangieren und mit neu eingeschleustem Material angereichert werden. Da die Durchlaufzeiten je nach Produkt im Bereich von 4…10 Wochen liegen, sind die Nachwirkungen von größeren Linienstörungen auch oft erst nach drei Monaten vollständig abgeklungen. Verstärkt wird die in der Kapazitätsplanung zu berücksichtigende Komplexität durch weitere Randbedingungen, sowohl aus Sicht Qualitätssicherung (z.B.

Wartezeitbegrenzung vor Prozessbeginn mit Absicherung durch KANBAN-Steuerung) als auch Fertigungslogistik (setupoptimierte Fahrweise, Batchbildung, beschränkte Prozessfreigaben auf Anlagen durch Horizontal- und Vertikaldedizierungen). Derartige Effekte lassen sich nur mit Simulation bewerten.

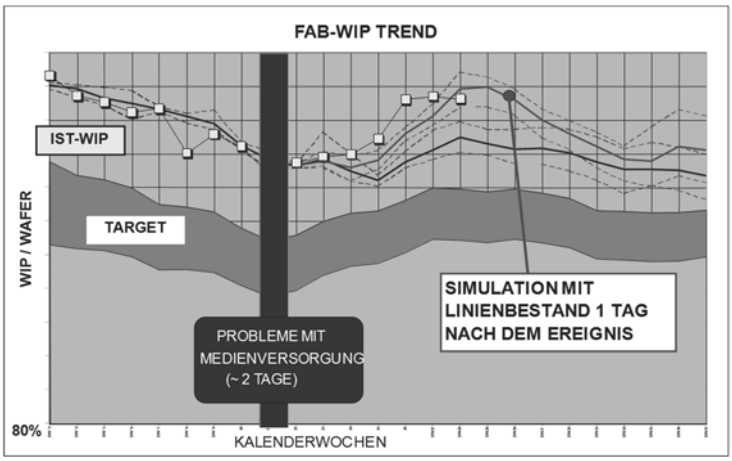


Abbildung 1: *Mehrwöchig verzögerter Bestandsanstieg (WIP) in der Fabrik nach einer Störung in der Fertigung wurde richtig vorhergesagt*

Besonders in der Halbleiterfertigung muss einerseits auf hohe Kosteneffizienz geachtet werden, das heißt hohe Auslastung des extrem teuren Anlagenparks, andererseits müssen wie bei jeder Auftragsfertigung die vereinbarten Liefertermine für alle Produkte sicher eingehalten und kurze Durchlaufzeiten für Entwicklungsprodukte abgesichert werden. Das erfordert wiederum ein intelligentes, lieferterminorientiertes Steuersystem auf Basis simulationsvalidierter Dispatchregeln. Im operativen Bereich ergibt sich die Notwendigkeit einer Anlieferungsvorhersage auf Anlagenebene zur proaktiven Ressourcensteuerung bei erwarteten Kapazitätsengpässen und zur zeitlich optimalen Einplanung von Wartungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der erwarteten Bestandssituation. Letzten Endes gipfeln die verschiedenen Simulationsanwendungen nicht nur in einer besseren Vorhersagbarkeit der Leistungskennzahlen und Beherrschbarkeit von Fertigungsstörungen sondern in einer um mindestens 3% erhöhten Kapazität der Fabrik.

2 Anwendungen der diskreten Simulation (Überblick)

Diskrete Simulation wird bei Infineon Dresden auf allen Ebenen in der Fertigung, beginnend bei Maschinen über Workcenter und das automatische Transportsystem (AMHS) bis zur Gesamtabbildung Fabrik angewendet, wobei kein „Supermodell“ für alle Anwendungen existiert. Toolsimulation betrifft die Optimierung interner Vorgänge, wie Handlingzeiten oder Synchronisation von Prozessen in verschiedenen Prozesskammern zur Durchsatzsteigerung, bei Workcentersimulation wird z.B. die Abarbeitungsreihenfolge der Lose in der Warteschlange optimiert. Diese Anwendungen erfolgen i.a. im Rahmen von Produktivitätssteigerungsprojekten.

Fabriksimulation ist dagegen voll ins Tagesgeschäft der Kapazitätsplanung und Liniensteuerung integriert. Je nach Anwendungsziel wird zwischen strategischer und operativer Simulation unterschieden, je nach betrachtetem Zeitraum (mehrere Monate bzw. einige Tage oder Stunden) zwischen Langfrist-, Kurzfrist- und Ultrakurzfristsimulation, siehe auch Reijers (1999). Bei operativer Simulation ist die zeitliche Änderung von Kenngrößen im Fokus, wobei bei der Langfristsimulation die Entwicklung von Fabrikkennzahlen in den nächsten Monaten vorhergesagt wird und bei der Kurzfristsimulation die Anlieferungsprognose für Arbeitsplätze für die nächsten Tage im Fokus steht. Bei allen Anwendungen gibt es signifikante Unterschiede bezüglich der Modellierungsansätze, speziell dem Umgang mit stochastischen Ereignissen, der notwendigen Datengranularität sowie im erforderlichen Automatisierungsgrad.

3 Strategische Fabriksimulation

Strategische Fragestellungen, wie die dynamische Bewertung von Kapazitätsausbaustufen, insbesondere welche Durchlaufzeiten trotz lokaler Kapazitätsengpässe erreichbar sind, werden mit steady-state Simulation beantwortet. Mit statischen Kapazitätsplanungsmethoden allein kann z.B. die ausgleichende Wirkung niedrig ausgelasteter Anlagengruppen oder Abschattungseffekte des Bottlenecks auf nachgelagerte Arbeitsplätze nicht erfasst werden. Das heißt im Fokus ist auch hier die punktuelle Investeinsparung.

Das Fabrikmodell wird hierbei mit festem Einschleusplan und Basisdatenset sowie typischen stochastischen Störungen (z.B. Maschinenausfälle, Störungen im Transportsystem) gestartet und nach einer üblichen Einschwingphase von einem Jahr aus den beiden Folgejahren die Ergebnisse gewonnen.

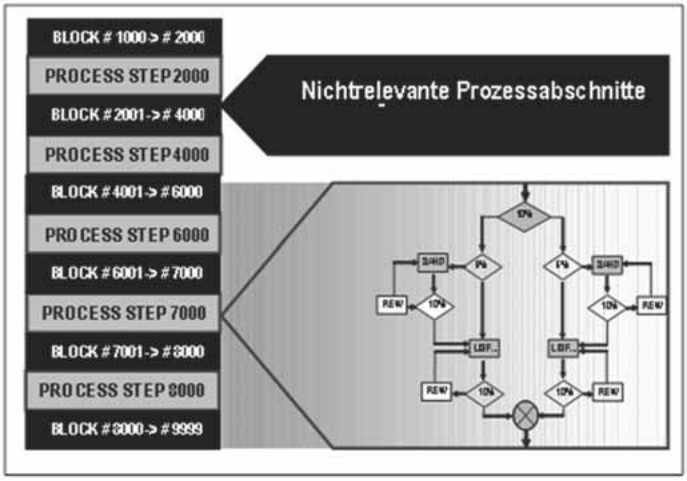


Abbildung 2: *Stark simplifizierter Modellierungsansatz zur Schwerpunktanalyse von Lithographieprozessen*

In Abhängigkeit von der Fragestellung werden teilweise sehr abstrakte Modelle verwendet, die generell manuell erzeugt werden. Abbildung 2 zeigt einen stark abstrahiert modellierten Prozessfluss (original ~800 Schritte) für eine Durchlaufzeitsimulation eines zukünftig geplanten Produktes, mit dem Schwerpunkt auf Aussagen zur Produktdurchlaufzeitbeeinflussung in Abhängigkeit von der Auslastung sehr preisintensiver Lithografieanlagen, also um Investmententscheidungen zu fundieren. Relevante Abschnitte sind detailliert abgebildet (Lithographie mit periodisch wiederkehrender Prozessierung von Vorläufern sowie Reworkschleifen), nichtrelevante Prozessabschnitte als Blöcke mit typischem Durchlaufzeitverhalten, abgeleitet aus Historiendaten. Aus derartigen Simulationen können wiederum Prämissen für die statische Kapazitätsplanung generiert werden (maximale Auslastungsgrenzen für Workcenter).

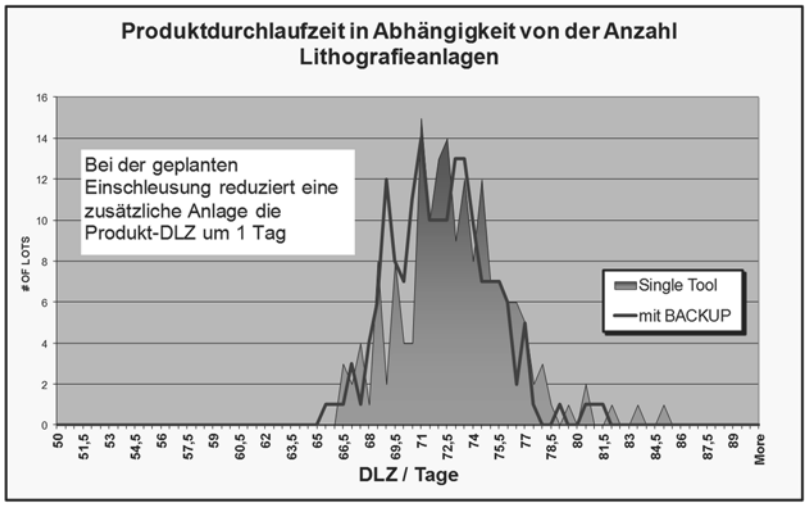


Abbildung 3: *Simulationsergebnis zur Fragestellung, wie sich eine punktuelle Kapazitätserweiterung auswirken würde*

4 Taktische Fabriksimulation

Ziel der taktischen Fabriksimulation ist die Vorhersage von Fabrikkennzahlen für einen Zeitraum der nächsten 3…6 Monate. Das betrifft zum Beispiel Bestand (WIP) und Bestandsverteilung, Kapazitätsauslastung, Produktdurchlaufzeiten mit Einfluss von Kapazitätsbottlenecks, Bewegungen (Anzahl prozessierter Scheiben) als Basis für die Operatorplanung und natürlich die Ablieferung aus der Fertigung. Diese transiente Simulation wird mit der aktuellen Bestandsverteilung initialisiert und basiert auf Informationen wie dem aktuellen Einschleusplan, erwarteten Änderungen im Anlagenpark (Anzahl Maschinen, Uptime) oder in den Arbeitsplänen. Die Ergebnisse werden aus zehn Konfidenzläufen gewonnen, wobei sich diese Anzahl als guter Kompromiss zwischen Rechenzeit (etwa 6…10 Stunden) und statistischer Relevanz der (wochenfeinen) Aussagen erwies.

4.1 Modellierungsansatz

Kernfrage ist, wie genau muss eine hochkomplexe Fabrik abgebildet sein, um valide Aussagen zu liefern, aber auch den Widerspruch zwischen einerseits hohem Detaillierungsgrad und andererseits Pflegeaufwand, Defizite in Datenverfügbarkeit und -qualität zu entschärfen. Als beste Lösung hat sich erwiesen, ausgehend von den vorher klar definierten Anwendungen mit einem simplifizierten Modell zu starten und in Abhängigkeit von den Validierungsergebnissen kritische Abschnitte feiner zu modellieren. Das betrifft die Abbildung der etwa 200 Arbeitspläne mittels etwa 20…25 Stellvertreterrouten. Zuordnungskriterien können technologische Besonderheiten (Anzahl Lithografieebenen, Defektdichtemesskonzept, …) oder auch logistische Gründe (Produktsteuerung) sein. Fertigungsbereiche wie Fotolithografie müssen detailliert abgebildet werden, um Besonderheiten mit extremen Einschränkungen bezüglich prozessbezogenen Anlagenfreigabe (horizontale Dedizierung) und weitere logistische Besonderheiten, wie zwingende Abarbeitung von Prozessketten auf gleicher Anlage bei kritischen Produkten (vertikale Dedizierung) oder auch das Thema periodische Prozessierung von Vorläuferlosen zur Prozessüberwachung zu erfassen. Andere Bereiche werden auf Workcenter-Ebene modelliert, das heißt mit formaler Gleichbehandlung aller bis zu etwa 15 Anlagen. Wichtig ist weiterhin eine pragmatische Vorgehensweise bei der Modellierung des „typischen Lebens“ einer Halbleiterfabrik, das heißt, neben üblichen stochastischen Eingangsgrößen eines Simulationsmodell, wie Maschinenausfallstatistiken und Prozesszeitstreuungen müssen seltene, aber doch regelmäßig wiederkehrende Ereignisse, wie Störungen in der Medienversorgung und im automatischen Transportsystem oder auch Fertigungsstopps durch Prozessprobleme, abgebildet werden, sonst wäre eine Langfristvorhersage zur Performanceentwicklung einer Fabrik immer zu optimistisch (Scholl 2008). Maschinenausfallstatistiken werden aus Historiendaten eines repräsentativen Zeitraums (normalerweise drei Monate) erzeugt, wobei im Einzelfall auch Doppelverteilungen im Simulationsmodell genutzt werden müssen. Für globale Fabrikstörungen gibt es natürlich keine statistisch belastbaren Historienwerte, hier muss auf langjährige Erfahrungswerte vertraut werden. .

4.2 Anwendungen

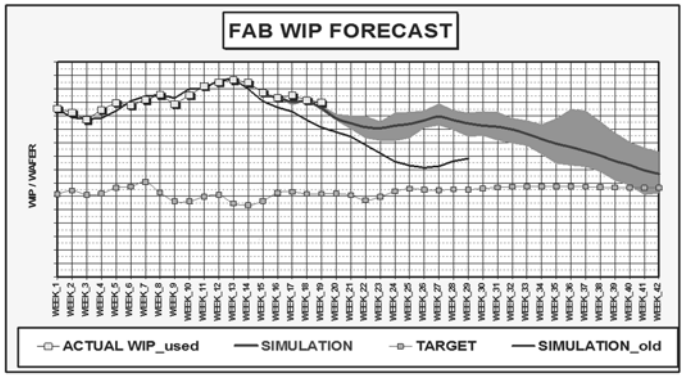


Abbildung 4: *Langzeitvorhersage auf Basis aktualisierter Prämissen zur Bestandsentwicklung (WIP) in der Fertigung*

Neben einer Vorhersage von Fabrikkennzahlen als Monitoring der Performance, sind Studien zum Einfluss von Uptime-Änderungen, zu temporären Einschleusungen über der planerischen Kapazitätsgrenze und zu Steuerungsänderungen wegen geänderter Auftragslage wichtig, immer mit Fokus auf Betrachtung der Nebenwirkungen. Speziell nach temporären Linienstörungen ist es wichtig zu zeigen, wie sich der lokal erzeugte Überbestand als Welle durch die gesamte Fertigungskette bewegt, wann an welchem Linienabschnitt Performanceprobleme als Spätfolge der Störung zu erwarten sind. Mit einem derartigen, anwenderfreundlich visualisierten Report, lässt sich auch sehr anschaulich die Wirkung verschiedener Recovery-Strategien zur Auflösung von Bottlenecksituationen zeigen.

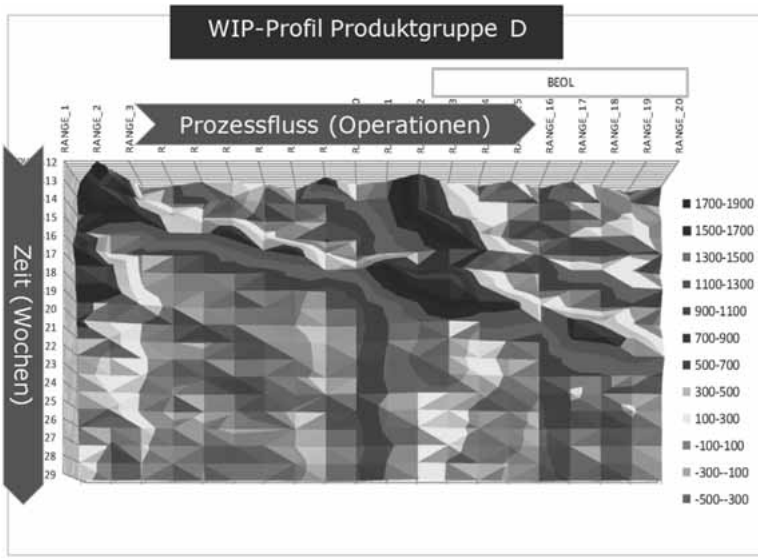


Abbildung 5: *Vorhersage der Bestandsentwicklung für definierte Prozessabschnitte in den nächsten Wochen nach einer Linienstörung im Range 2 in Woche 12*

Auch bei hoher Fabrikauslastung muss gegenüber zusätzlichen Kundenaufträgen flexibel reagiert werden können. Typische Fragestellungen sind nicht nur die erwartete Durchlaufzeit der zusätzlich eingeschleusten Aufträge, bei unter Umständen angepasster Produktsteuerung, sondern vor allem die Nebenwirkungen auf andere Aufträge. Interessant bei der finanziellen Bewertung von Zusatzaufträgen ist immer wieder der Verstopfungseffekt, das heißt eine Zusatzeinschleusung führt bei hochausgelasteter Fertigung temporär (zum Teil über mehrere Monate) sogar zu einer Verringerung des Ausstoßes der Fabrik. Diesen Effekt gilt es gegebenenfalls durch Anpassung der Steuerung, wiederum auf Basis von Simulationen, auf weniger lieferkritische Produkte zu verlagern.

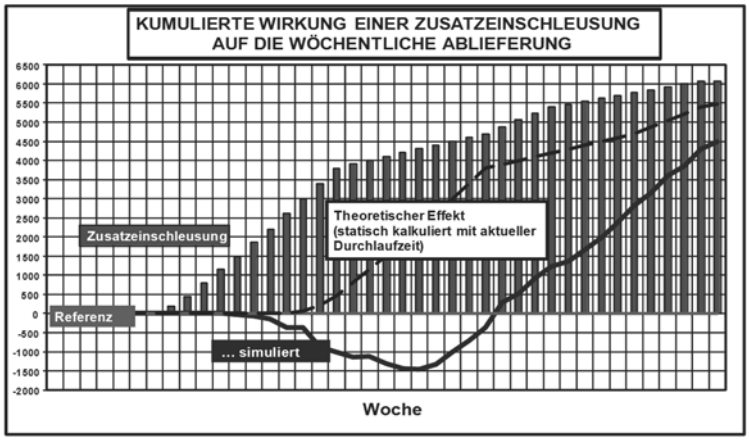


Abbildung 6: *Simulierte Wirkung einer Zusatzeinschleusung bei vollausgelasteter Fabrik auf die Ablieferung - im Vergleich zur theoretisch kalkulierten Erwartungshaltung*

5 Operative Fabriksimulation

Im operativen Betrieb ist für einen Horizont von maximal einer Woche die tagfeine Vorhersage von Losankünften an den Arbeitsplätzen wichtig zur Ressourcenplanung und zum proaktiven Management von erwarteten temporären Kapazitätsengpässen.

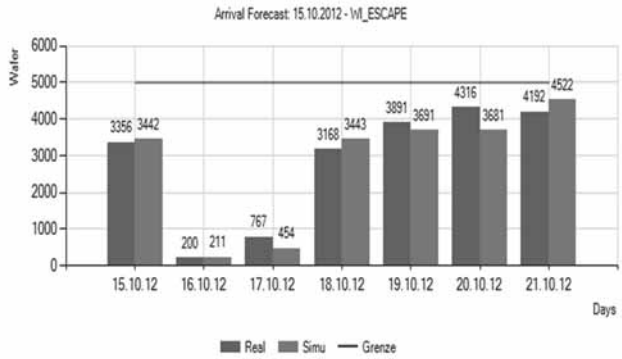


Abbildung 7: *Vergleich 7-Tage-Anlieferungsvorhersage für einen Arbeitsplatz mit Ist-Werten*

5.1 Modellierungsansatz und Systemarchitektur

Prämissen für eine operative Kurzfristsimulation sind eine kurze Simulationslaufzeit (deutlich unter einer Stunde) verbunden mit einer automatischen Modellgenerierung. Die Abbildung der Fabrik hat hochdetailliert zu erfolgen (Scholl 2010), das heißt nicht nur die Implementierung aller aktiver Arbeitspläne sondern aufwendige Modellinitialisierung mit aktuellen Restzeiten bei laufenden Prozessen, mit aktuellen Anlagenausfällen und erwarteter Reaktivierung, mit allen aktuellen

Prozesssperrungen und weiteren Restriktionen. Ganz klar im Gegensatz zur Langfristsimulation steht die so weit wie möglich deterministische Modellierung der Fabrik im Vordergrund. Während die taktische Langfristsimulation vorrangig auf Daten aus dem Kapazitätsplanungstool und Historiendaten für stochastische Störungen basiert, verlangt die operative Simulation mit ihrem bedeutend höheren Bedarf an aktuellen Fertigungsdaten neben einer automatischen Modellbildung eine Kopplung aller fertigungsrelevanten Infineon-Datenquellen (~30 Datenbanken, Exceltabellen usw.). Zur Detektierung und Korrektur fehlerhafter sowie Ersatz fehlender Daten mussten entsprechende Analysetools und Prozeduren entwickelt werden. Die hochkomplexe Modellarchitektur wurde zusammen mit D-Simlab Technologies realisiert (D-SIMLAB 2013).

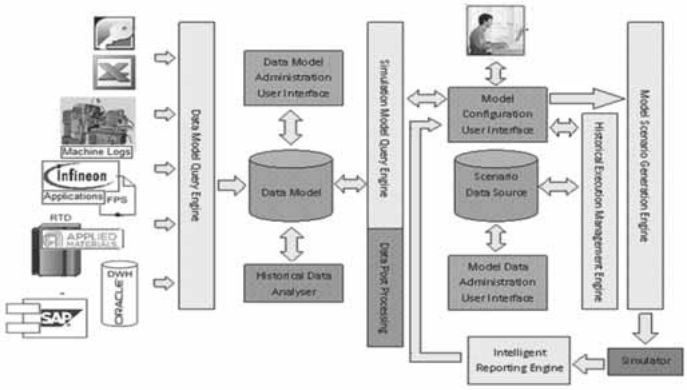


Abbildung 8: *Modellarchitektur für operative Fabriksimulation (vereinfachte Darstellung)*

Zur Beherrschung der riesigen Datenmengen und Reduzierung der täglichen Refresh- und Modellgenerierungszeit erfolgt eine Klassifizierung der Daten in Snap-Shot und Master mit unterschiedlichen Aktualisierungszyklen. Zudem muss die Funktionsweise der einzelnen Systemkomponenten automatisch überwacht werden.

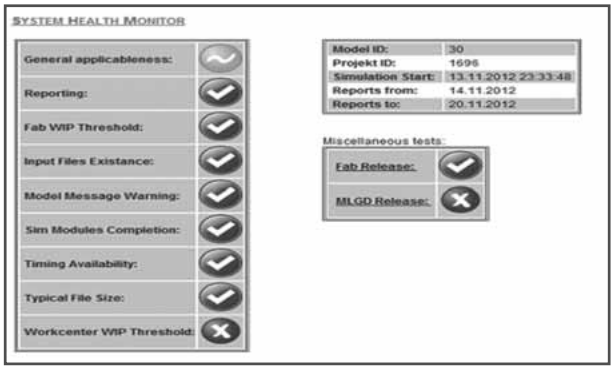
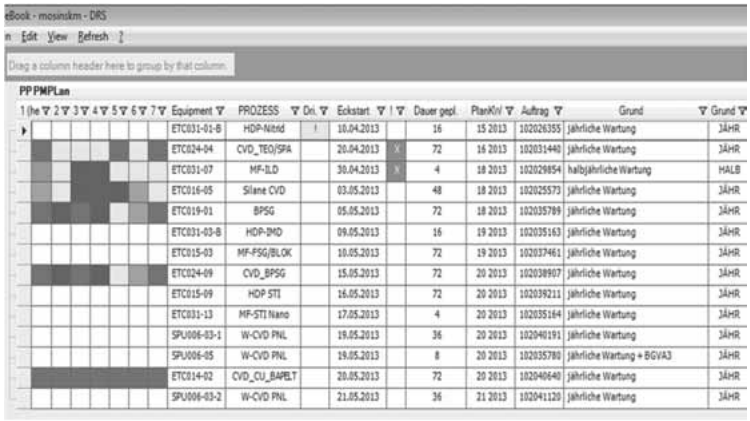


Abbildung 9: *System Health Monitor zur automatischen Überwachung der wichtigsten Funktionalitäten*

5.2 Anwendungen

Bei vorhergesagtem kritischem lokalem Bestandsaufbau ist ein proaktives Bottleneckmanagement möglich, das kann die zusätzliche Bereitstellung von Ressourcen oder auch zum Beispiel temporäre Anpassung von Messprogrammen sein. Wichtigste Anwendung der operativen Kurzfristsimulation ist die optimale Einplanung von Wartungsmaßnahmen an Anlagen in Abhängigkeit von der erwarteten Anlieferung (Scholl 2012). Nach Erreichen der Fälligkeit für eine Wartung wird auf Basis der Anlieferungsvorhersage entschieden, an welchem Tag innerhalb des Fälligkeitsfensters die geringsten Auswirkungen auf die Performance des Arbeitsplatzes zu erwarten sind.



Equipment	PROZESS	Dri.	Eckstart	!	Dauer gepl.	PlanKr/	Auftrag	Grund	Grund
ETC031-01-B	HDP-Nitrid		10.04.2013		16	15 2013	102026355	jährliche Wartung	JÄHR
ETC024-04	CVD_TEO/SPA		20.04.2013	X	72	16 2013	102031440	jährliche Wartung	JÄHR
ETC031-07	MF-ILD		30.04.2013	X	4	18 2013	102029854	halbjährliche Wartung	HALB
ETC016-05	Silane CVD		03.05.2013		48	18 2013	102025573	jährliche Wartung	JÄHR
ETC019-01	BPSG		05.05.2013		72	18 2013	102035789	jährliche Wartung	JÄHR
ETC031-03-B	HDP-IMD		09.05.2013		16	19 2013	102035163	jährliche Wartung	JÄHR
ETC015-03	MF-FSG/BLOK		10.05.2013		72	19 2013	102037461	jährliche Wartung	JÄHR
ETC024-09	CVD_BPSG		15.05.2013		72	20 2013	102038907	jährliche Wartung	JÄHR
ETC015-09	HDP STI		16.05.2013		72	20 2013	102039211	jährliche Wartung	JÄHR
ETC031-13	MF-STI Nano		17.05.2013		4	20 2013	102035164	jährliche Wartung	JÄHR
SPU006-03-1	W-CVD PNL		19.05.2013		36	20 2013	102040191	jährliche Wartung	JÄHR
SPU006-05	W-CVD PNL		19.05.2013		8	20 2013	102035780	jährliche Wartung + BGVA3	JÄHR
ETC014-02	CVD_CU_BAPELT		20.05.2013		72	20 2013	102040640	jährliche Wartung	JÄHR
SPU006-03-2	W-CVD PNL		21.05.2013		36	21 2013	102041120	jährliche Wartung	JÄHR

Abbildung 10: *Elektronisches Anlagenbuch mit integrierter qualitativer Anlieferungsvorhersage für die nächsten sieben Tage*

Zu diesem Zweck werden die simulierten Anlieferungsmengen qualitativ auf Basis der zur Verfügung stehenden Anlagenkapazität bewertet und in eine Ampeldarstellung übersetzt. Die Ergebnisse werden in das elektronische Anlagenbuch integriert, so dass durch die Instandhaltungsspezialisten auf einen

Blick sowohl zur Wartung fällige Anlagen als auch die Empfehlung zur zeitlichen Durchführung der Wartungsmaßnahmen erscheinen. Detailliertere Reports, wie Informationen zu den Ankunftsströmen oder der Vergleich von vergangenen Vorhersagen mit Istwerten, sind bei Bedarf sofort verfügbar und helfen, die Ergebnisse aus der Simulation zu plausibilisieren.

6 Zusammenfassung

Die Realisierung der Simulationsanwendungen bei Infineon Dresden war ein Prozess über mehrere Jahre, verbunden mit der Anpassung von Geschäftsprozessen zur Kapazitätsplanung. Mit zunehmender Zeit zeigte sich, dass die ursprüngliche Vision, ein vollautomatisiertes Mastermodell als Grundlage für alle Simulationsanwendungen zu nehmen, nicht machbar ist. Jede Anwendung erfordert seine spezielle Modellierungsphilosophie. Anhand von typischen Anwendungen wurde gezeigt, wie wertvoll die diskrete Simulation (DES) zur Beherrschung der komplexen Halbleiterfertigung sein kann. Neben einer generell besseren Vorhersagbarkeit von Langzeitwirkungen sowohl von Störungen als auch geplanten Eingriffen in den Fertigungsablauf ist es möglich, durch gezielten Einsatz der strategischen und taktischen Simulation die Fabrik um mindestens 3% höher auszulasten. Der beschriebene Einsatz von operativer Kurzfristsimulation zur Wartungsplanung hat allein in einem kritischen Fertigungsbereich zu einer Reduzierung der Durchlaufzeit um mindesten einen Tag beigetragen. Für das nächste Jahr steht das komplette Ausrollen der simulationsbasierten Wartungsplanung auf alle Fertigungsbereiche im Fokus, weiterhin wächst die Anzahl der Anwendungsfelder ständig.

Literatur

D-SIMLAB, 2013. “D-SIMCON – An Overview”. http://www.d-simlab.com/dsimcon.htm Accessed April. 10th, 2013

Reijers, H.A., W.M.P. van der Aalst. 1999. “Short-term simulation: bridging the gap between operational control and strategic decision making”, In *Proceedings of the IASTED International Conference Modeling and Simulation (MS ’99)*.

Scholl, W. 2008. “Coping with typical unpredictable incidents in a logic fab”. In *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, ed. S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, and J. W. Fowler, 2030-2034. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Scholl, W., B.P. Gan, D. Noack, P. Preuss, M.L. Peh, P. Lendermann, and O. Rose. 2010. “Towards Realization of a High-Fidelity Simulation Model for Short-Term Horizon Forecasting in Wafer Fabrication Facilities.” In *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, edited by B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, and E. Yücesan, 2563-2574. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Scholl, W., B.P. Gan, D. Noack, P. Preuss, P. Lendermann, and M. Mosinski. 2012. “A Multi-stage Discrete Event Simulation Approach for scheduling of Maintenance Activities in a Semiconductor Manufacturing Line” In *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, edited by C. Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, and A.M. Uhrmacher, eds

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

The Impact of Accuracy in Lot Arrival Prediction on Solution Quality for the Parallel Batch Machine Scheduling Problem in Wafer Fabrication

Genauigkeit in Losankunftvorhersagen bei der Losablaufplanung an parallelen Batch-Anlagen in der Halbleiterfertigung

Robert Kohn, Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany), robert.kohn@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Abstract: Solving Parallel Batch Machine Scheduling Problems (PBMSP) with dynamic arrivals profits to a large extend from information about future arrivals, which need to be predicted by using equipment models. Since any prediction comes with errors, we face the problem that scheduling systems may take decisions on the basis of erroneously predicted job arrivals. This study evaluates the impact of job arrival prediction errors on solution quality, respectively their influence on optimization potential. The experimental system solves the PBMSP with incompatible job families and dynamic arrivals using the Variable Neighbourhood Search (VNS) combined with the Time Window Decomposition (TWD). In the case of non-existing prediction errors compared to FIFO dispatching, the results show up to 10% improvements in total cycle time for look-ahead horizons around the average processing time. We observed a loss of up to 50% of the improvements for prediction error schemes where prediction errors are equal to the average processing time.

1 Introduction

The economic competitiveness of semiconductor manufacturers relies to a not negligible extend on an effective shop floor control system. Under constant pressure of cost reduction proper material flow control policies enable companies to manage production according to their goals, for example in terms of cycle times or customer delivery dates

Batch machines represent a significant proportion in semiconductor wafer fabrication and consequently significantly contribute to overall lot cycle times. Here a batch defines a quantity of jobs grouped together to be processed on a machine as one operation. Managing cycle times, work-in-progress (WIP), throughput and tardiness measures of batch machines have been continuously considered as points of interest for both research and industry. Usually furnaces that perform oxidation

and diffusion processes serve as representatives for batch machines, providing space for up to 200 wafers in their reactor. But also wet benches used for cleaning and etching the wafer surface process jobs as batches, where up to 100 wafers are processed together in one run.

Commonly the problem is to schedule WIP waiting in front of a set of parallel batch machines, where forming batches as well as sequencing and partitioning batches characterize the decision-making process. For that purpose and given that dispatching is still state of the art in production control, various dispatching heuristics have been proposed in literature. Earlier approaches focus on finding optimal or near-optimal batch sizes, bearing in mind that near-optimal batch sizes directly change with the level of utilization. Determining proper values for batch sizes particularly becomes problematic in a multi-product fabrication characterized by incompatible job families.

In order to overcome the problem of finding suitable batch sizes newer approaches incorporate future job arrivals, where the approach that includes information about next arriving jobs is commonly referred to as "look-ahead strategy". To provide the greatest leverage for effective dispatching and scheduling of batch machines the employing of upstream information into the decision-process is considered.

Beside dispatching strategies, scheduling approaches powered by optimization techniques continuously gain more importance for shop floor control. Because of rapidly emerging optimization methods and computer systems, scheduling approaches will likely play an important role within the next years and stepwise replace today's dispatching systems.

Scheduling solutions powered by optimization have been focused stronger than ever before in cause of effective search methods and constantly increasing computing power of modern computer systems. Research and industry work intensely on scheduling topics in order to replace (state of the art) dispatching rule based systems by more powerful scheduling solutions sooner or later.

Operational scheduling promises to realize optimization potentials in production logistics unreachable for common dispatching systems. Especially (meta)heuristics seem to be practicable to tackle complex scheduling problems of dimensions interesting for practitioners in industry. Here especially PBMSPs are in the focus of researchers and fab managers. Equivalent to related dispatching approaches, batch scheduling strategies profit extensively from look-ahead information, which provide predicted job arrivals over a certain time horizon.

Unfortunately, any prediction, regardless of the scope or intention, comes with errors - and so does job arrival prediction. Motivated by the fact that look-ahead information remarkably contribute to optimization potentials and by the fact that predictions are generally erroneous, we are particularly interested in the impact of look-ahead prediction errors on solution quality.

2 Literature Review

As a lead-in to the vast variety of literature dealing with scheduling in the area of semiconductor manufacturing operations, we like to refer to a recent survey given in Mönch (2013). In the following we will give a short review of the most important

batching heuristics. For a more detailed review of batch scheduling (and dispatching) one will find extensive overviews in Mathirajan (2006).

Glassey (1991) presents the Dynamic Batching Heuristic (DBH) that for the first time incorporates information about future job arrivals, referred to as "look-ahead" in the following text. Fowler (1992) introduces the more sophisticated Next Arrival Control Heuristic (NACH) that exclusively considers the next job arrival (cf. Fowler 2000, Solomon 2002). Van der Zee proposes the Dynamic Job Assignment Heuristic (DJAH) that also considers look-ahead information (cf. van der Zee 2007). Habenicht (2003) discusses batching heuristics combined with Genetic Algorithms (GA) in order to minimize tardiness measures. Balasubramanian (2004) presents the Batched Apparent Tardiness Cost (BATC) heuristic for weighted tardiness minimization, empowered by a search scheme based on GA. Gupta (2006) proposes a due-date oriented control strategy using look-ahead information in order to minimize maximum tardiness and the number of tardy jobs. Sha also discusses look-ahead dispatching heuristics (cf. Sha 2007). Moreover, several batching heuristics aimed to minimize total weighted tardiness are discussed in Kim (2010).

In the area of scheduling empowered with optimization methods, there exists a variety of approaches to solve PBMS problems under consideration of various subsets of constraints. Reichelt (2006) examines a Multi-Population Genetic Algorithm (MPGA) and a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) for the PBMSP with the goal to minimize TWT and makespan at the same time. In Wang (2010), Klemmt (2011) one will find MIP formulations for PBMSPs which aim to minimize the makespan or the total weighted tardiness. Only for makespan optimization, Wang (2010) presents a comparison between MIP and approaches based on Simulated Annealing (SA) and Genetic Algorithms (GA), both enhanced with multi-stage dynamic programming (MSDP). Various Evolutionary Algorithms (EA), respectively nature-inspired search schemes, based on the GA concept have also been published, e.g. Chiang (2010), Kashan (2008), Malve (2007), Mönch (2005), Balasubramanian (2004) and Habenicht (2003). Damodaran (2011) presents a GRASP and an implementation of the SA search in Damodaran (2012), where both approaches minimize the makespan. There exist approaches employing the ACO concept in order to minimize the total weighted tardiness (TWT) for PBMSPs (cf. Mönch 2009; Li 2008; Raghavan 2006). In Cakici (2013) heuristic algorithms employing VNS schemes are discussed and compared to a mathematical model developed for the PBMSP with dynamic arrivals and incompatible job families. Almeder (2011) studies popular metaheuristics applied to the PBMS with incompatible job families in order to minimize TWT. They examine variants of ACO, GA and VNS and compare their performance. Klemmt (2009) studies PBMS with incompatible job families and dynamic job arrivals, comparing MIP and VNS with respect to TWT minimization. Jula (2010) presents an algorithm based on Linear-Programming (LP), an approach based on Integer Programming (IP) and a heuristic-based algorithm to solve non-homogenous PBMSPs with non-identical job sizes and incompatible job families. Yugma (2008) presents a solution approach based on Simulating Annealing (SA) applied for PBMSPs improving throughput, batch efficiency and flow time factor.

3 Design of Experiments

3.1 Experimental system

The experimental environment primarily consists of a simulation-based optimization framework developed to solve PBMSPs existing in wafer fabrication front-end facilities. The underlying system covers various PBMSPs that differ in their sets of constraints and objectives. For searching improved schedules, we implemented a generalized concept of VNS, offering numerous VNS variants, including most of those mentioned in related literature. The difference between those variants is basically the balance between exploitation and exploration of the search space, beside countless different parameter combinations to choose.

We consider the developed scheduling system as ready-for-pilot on an operational level, meaning that we are able to load (and validate) a currently existing problem instance with actual data from fab databases. After loading the problem instance, the scheduling procedure creates an improved schedule, which is immediately written back to the manufacturing execution system (MES) for execution. In addition to implemented real-world and real-time features a model generator offers to create user-defined PMSP instances with specific characteristics. The model generator sets important model variables using random numbers following standard statistical distributions in order to generate a set of independent model instances that fundamentally show equal characteristics, but also differ slightly from each other.

We use a database to establish the data management which is necessary to run the experimental system in an effective (and comfortable) manner. The entire experiment data representing the input parameters (including the model instances) as well as the output results are accessible via database connections. The entire system is limited to PMSP instances that do not exceed 5GB in their compressed size, which equals to the maximum size for a Character Large Object (CLOB). Since large simulation (optimization) experiments often suffer from a lack of computing power and time availability, we delegate extensive studies to a High Performance Computing (HPC) cluster with 64 cores connected to the database. The entire system is written in C# with a greater focus on the code comprehensibility than on the speed of computation, so far.

3.2 Parallel Batch Machine Scheduling Problem (PBMSP)

We describe the scheduling problems examined in this study by the use of the α|β|γ-classification scheme proposed in Graham (1979). Under study the PBMSP incorporates unequal processing times, dynamic arrivals, job specific machine dedications, parallel batching with incompatible job families and arbitrarily maximum batch sizes for a job family on a machine, respectively $Rm|M_j, r_j$, *p-batch, incompatible,* $bmax|TCT$. The following list introduces the α|β|γ-notations used throughout the rest of the paper:

- *Rm:* unrelated parallel machines (with unequal processing times)
- M_j*:* machine dedications (a job is dedicated to a restricted set of machines)
- r_j : non-zero release date of a job (dynamic arrivals)
- *p-batch:* parallel batching (a number of jobs is processed simultaneously on a machine)

- *incompatible:* incompatible job families (jobs of different families cannot be processed together)
- $bmax_j$*:* arbitrarily maximum batch size for a job family on a machine
- $bmin_j$*:* arbitrarily minimum batch size for a job family on a machine
- tb_j*:* arbitrary time bound constraint for a job

For the experiments of this study we created numerous test instances, where each represents a PBMS problem with certain characteristics. The default model contains five machines and 500 jobs to be scheduled at the utilization level of 0.9, where the predicted job arrivals are uniformly distributed between zero and the expected makespan. Five incompatible job families are dedicated to five machines, which results in a square dedication matrix with 25 cells. Using a dedication density factor of 0.7 we create 17 to 18 combinations between a certain machine and a certain job family. The process time for each job family on a machine is uniformly distributed between 240 and 360 minutes, which results in average processing time equals to 300 minutes. The maximum batch size equals eight lots without exception. The default model is then extended with a certain arrival error scheme, which results in a model template with specific characteristics. Finally, we created 30 independent instances for each model template with specific characteristics, especially with regard to various arrival error schemes, which we intend to examine.

3.3 Variable Neighborhood Search (VNS)

Mladenović (1997) proposes the VNS heuristic based on neighbourhood structures used to solve large scale combinatorial problems. The simulation-based optimization framework that we use to solve PBMSPs employs VNS to create optimized schedules with respect to focused objectives. We implemented VNS as an abstraction of the proposed schemes, which allows us to freely configure two nested search levels. Both levels can be parameterized independently from each other, where each search level defines a set of neighbourhood structures: the local search procedure (first improvement or best improvement) and the shaking policy managing the shaking range (either constant or increasing). This generalized implementation of VNS covers a wide range of VNS variants described in literature, namely Reduced VNS (RVNS), Variable Neighbourhood Descent (VND), Generalized VNS (GVNS), Variable Neighbourhood Decomposition Search (VNDS) and Skewed VNS (SVNS). For detailed descriptions see Hansen (2009). By combining strategies and parameter, we get hundreds of VNS search schemes - deterministic variants that only employ local search as well as stochastic variants that manage to escape from local optima. Those variants basically differ in their balance between exploring and exploiting search space. Additionally, the system supports MOO, whereas multiple objectives are combined hierarchically or weighted or are equally combined in order to improve pareto fronts.

Six neighbourhood structures create subspaces of the entire search space by encapsulating a certain set of operations used to modify the schedule. The implemented neighbourhoods are defined as follows:

- Merge two batches: find two batches to merge to one of them (and new position).
- Split a batch: find a batch to split and insert the newly emerging batch at a new position.

- Swap two batches: find to batches and swap their positions.
- Move a batch: move a batch to another position.
- Swap two jobs: find two jobs out of different batches and swap them.
- Move a job: find a job and move it to another batch.

Since heuristic search procedures operate on given solutions, we need to provide an initial schedule as start solution for each problem instance. We use dispatching rules executed in a simulation system to generate initial schedules, which also provide reference objective measures for analysing improvements gained by optimization. We use First-In-First-Out (FIFO) as simple dispatching rule that also serves as reference when determining the improvements obtained. The dispatching interval is set to three minutes, which means that every three minutes the dispatching procedure is executed, which probably results in a new batch started. For the purpose of this paper, we prefer to use simple dispatching rules instead of more sophisticated dispatching heuristics (BATC, NACH) described in literature. This papers' primary objective is neither to evaluate search method performances, nor to evaluate exact optimization potentials for certain model specifics, but to study the impact of accuracy in lot arrival prediction on solution quality.

For the optimization method we chose the VND as appropriate search strategy to demonstrate the effects of prediction errors. The objective to optimize is total cycle time (TCT). The maximum deadline for improving a schedule framed by a single time window is set to one minute. However, the average computing time never exceeds five seconds computing time per time window on average. The VND can be considered as a deterministic (best improvement) local search strategy operating on a limited set of neighbourhoods specifically designed to solve the parallel batch machine problem. There are two reasons justifying our decision to apply a deterministic VNS variant, instead to choose a stochastic one, which has been proven to outperform deterministic approaches. On the one hand, the deterministic behaviour of VND reduces the total number of experimental runs, since there is no need to run multiple replications that guarantee a certain level of statistical reliability, in contrast to stochastic VNS derivates. On the other hand, the deterministic local search provides a better understanding of scheduling complexity with regard to the size of problem instances. The examination of measured computing times and/or number of search moves, combined with the analysis of improvements by optimization related to performance measures, makes clear whether local optima can be found for certain problems in compliance to given computational deadlines. Additionally, in order to minimize the burden of analysing averages and variances in experiments and increase understandability and reliability of experimental results at the same time, we waived the use of stochastic search. In turn, deterministic search avoids analysing variances resulting from stochastic effects, caused by multiple replications. We also like to point to the fact that potentials in optimization considerably depend on model characteristics. Based on extensive studies, we observed that there don’t exist non-negligible variances for simulation (optimization) results among a set of independent instances belonging to the same model type.

Combined with the Time Window Decomposition (TWD), the VNS opens up the possibility to create optimized schedules for even large problem instances. Applied as simulation procedure, TWD also makes it possible to study additional factors, e.g.

the effect of rescheduling frequency or length of look ahead horizons (cf. Ovacik & Uzsoy 1995). For the presented experiments we use TWD as decomposition and simulation technique, where the interval for each time window is set to 30 minutes. This means, every 30 minutes a new time window begins and a new scheduling problem is solved. The maximum look-ahead horizon is subject to the examined experiment parameters.

4 The impact of prediction errors

Following the three laws of forecasting (cf. Hopp 2001), any prediction comes with errors due to the fact that models used for prediction are always simplified abstractions. The lack of modelled system behaviour, considered as negligible model details for the sake of model simplicity, necessarily results in prediction errors.

Scheduling, simulation and sophisticated dispatching systems have one thing in common: all of them make use of wafer fabrication equipment models. Those equipment models build the backbone for simulation systems and provide predictions for job completion dates and job arrivals, which facilitate scheduling and dispatching decisions. The most widespread equipment model, which consists of a set of formulas embedded in a proper algorithm, is analytical. Analytical equipment models are considered to provide a balanced trade-off between accuracy in prediction and speed of computation, both equally important for scheduling and simulation.

Usually, studies discussing PBMSPs with dynamic arrivals take those arrivals as errorless in their models. Due to the fact that look-ahead information is widely considered to be the largest source of optimization potentials in PBMSPs and taking into account that any prediction is erroneous, the impact of prediction errors on scheduling benefits is of particular interest for practitioners.

In order to evaluate the effect of errors in job arrival predictions we extended the TWD scheme in a way that predicted arrivals may be subject to disturbances. Therefore, the implemented model contains two dates for any job arrival: the predicted arrival date and the disrupted date that is finally used for schedule evaluation. The arrival dates are exposed to a normal distribution of offset errors, which may add a positive or negative delay to the originally predicted arrival. Therefore, we implemented two schemes in order to examine the effect of prediction errors. Within the first scheme the mentioned offset is given as an integer value, which represents the prediction error in minutes. Here the prediction error is simply taken from randomly generated distribution of integers within the given range. The second one applies an error scheme considering the actual look-ahead horizon for any predicted arrival. Here we calculate the prediction error for a certain job as the product of the time of the predicted arrival and a factor taken from a normal distribution. This way we take the fact into account that the more far a predicted event lies in future, the worse is the prediction in terms of the accuracy. According to TWD, any new time window is considered as a new scheduling problem. The VNS-based search procedure improves the schedule by taking the predicted job arrivals without errors into consideration. Then the improved schedule is simulated again in order to incorporate the erroneous arrival dates. Figure 1 shows the entire computational results in one diagram.

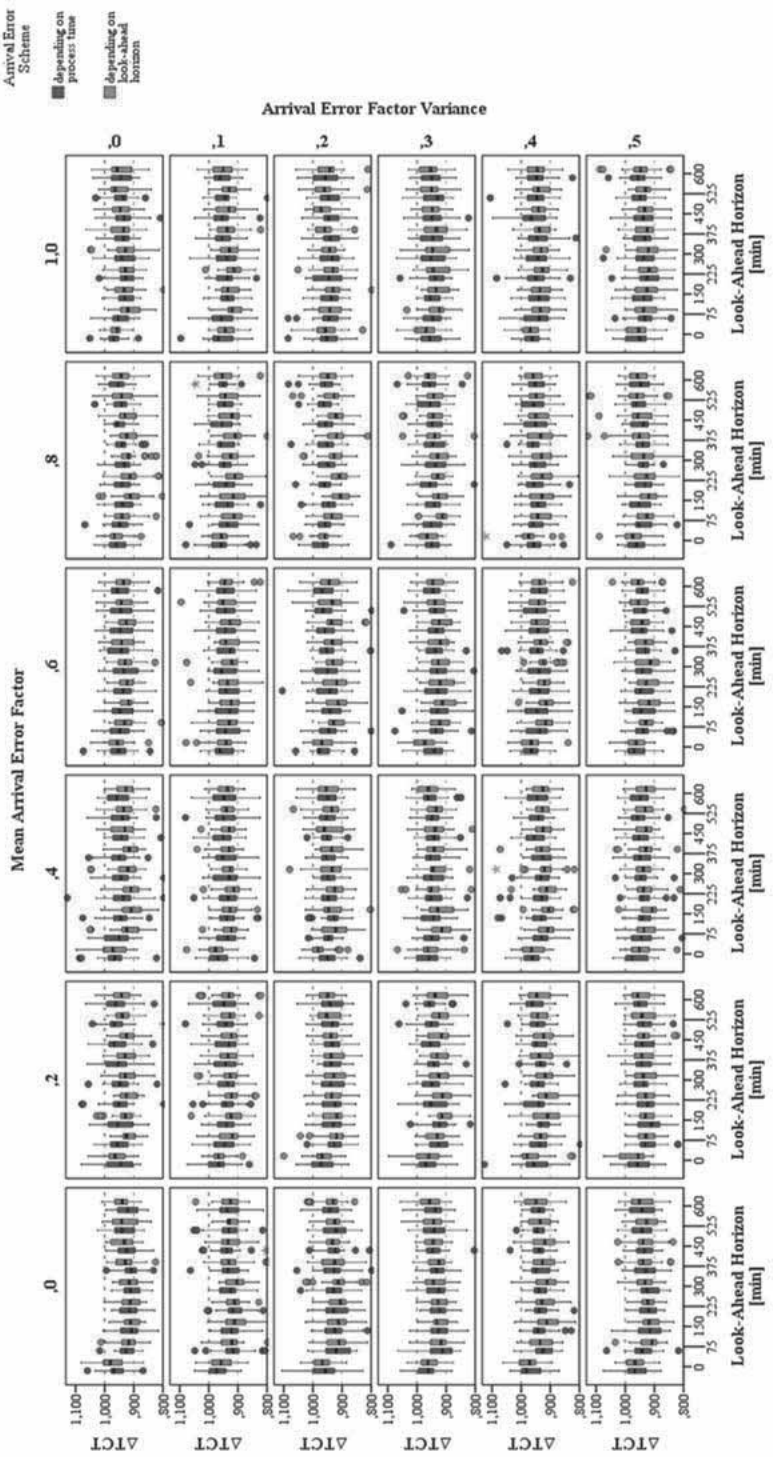


Figure 1: *Computational results*

4.1 Prediction errors depending on the average process time

This experiment provides results that are used to discuss the effect of prediction errors on optimization potential. We defined 36 model types that vary in their arrival error scheme, where six levels for the mean value and six levels for standard deviation value have been examined. The mean error varies between zero and the average processing time, respectively chosen from the array {0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0}. The value for the standard deviation lies between zero and one half of the average processing time, where the value belongs to the array {0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5}. For each model type we created 30 independent instances which result in 1080 problem instances in total. Additionally, the look-ahead horizon varies from zero to twice the average processing time, chosen from {0, 75, 150, 225, 300, 375, 450, 525, 600}. In total, the entire experiment took 9720 runs without those runs that provide the reference solutions.

When analysing the experimental results, we identified the following observations. We observed higher improvements for higher look-ahead horizons. Beginning with values for the look-ahead horizon greater than the average processing time, the observed benefit decreases slightly. As expected, higher mean error values generally result in lower improvements. Comparing the zero error case (best solution 0.9) with the case where the mean value equals the average processing time (best solution 0.95), we observed a loss of half of the benefit. The impact of the standard deviation in errors is less than expected: Compared to the zero standard deviation cases we observed two percent loss in benefit at maximum

Higher values for standard deviation partially lead to better solutions; in the high mean error cases, a higher spread of errors results in slightly better solutions, whereas in the low mean error cases a higher spread leads to worse solutions.

4.2 Prediction errors depending on the look-ahead horizon

In correspondence to the previous discussed experiment, we carried out 9720 simulation runs providing the results we used to discuss the effect of prediction errors on optimization potential. The difference is that we calculate the error in prediction as a function of the actual look-ahead horizon. We defined six levels for the mean value and six levels for standard deviation value, which results in 36 model types that vary in their arrival error scheme. The mean error varies between zero and the actual look-ahead horizon, respectively chosen from the array {0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0}. The value for the standard deviation lies in between zero and one half the actual look-ahead horizon, where the value belongs to the array {0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5}. Given that, we create 30 independent instances for each model type, we get 1080 problem instances in total. As in the previous experiment, the look-ahead horizon varies from zero to twice the average processing time, chosen from {0, 75, 150, 225, 300, 375, 450, 525, 600}.

5 Conclusions

Based on our experiments and in accordance with previous studies, we observed greater improvements for higher look-ahead horizons. As expected, higher mean error values generally result in lower improvements. Comparing the zero error case

(best solution 0.9) with the case where the mean value equals the average processing time (best solution 0.95), we observed a loss of half of the benefit.

The impact of the standard deviation in errors is less than expected: Compared to the zero standard deviation cases, we observed two percent loss in benefit at maximum. Even higher values for the standard deviation partially lead to better solutions; in the high mean error cases a higher spread of errors results in slightly better solutions, whereas in the low mean error cases a higher spread leads to worse solutions.

Acknowledgement

We like to thank our colleges from Infineon Technologies for their support at any time. Special thanks go to Jens Doleschal and Manfred Benesch from Dresden University of Sciences who maintain server and systems essential for our experiments with all their expertise and commitment. This work was supported by Grant 13N11588 of the Federal Ministry of Education and Research Germany.

References

Almeder, C.; Mönch, L.: Metaheuristics for scheduling jobs with incompatible families on parallel batching machines. JORS 62 (12), 2011, pp. 2083–2096.

Balasubramanian, H.; Mönch, L.; Fowler, J.W.; Pfund, M.E.: Genetic algorithm based scheduling of parallel batch machines with incompatible job families to minimize total weighted tardiness. International Journal of Production Research 42 (8), 2004, pp. 1621–1638.

Cakici, E.; Mason, S.J.; Fowler, J.W.; Geismar, H.N.: Batch scheduling on parallel machines with dynamic job arrivals and incompatible job families. International Journal of Production Research 51 (8), 2013, pp. 2462–2477.

Chiang, T.-C.; Cheng, H.-C.; Fu, L.-C.: A memetic algorithm for minimizing total weighted tardiness on parallel batch machines with incompatible job families and dynamic job arrival. Computers & Operations Research 37 (12) 2010, pp. 2257–2269.

Damodaran, P.; Vélez-Gallego, M.C.: A simulated annealing algorithm to minimize makespan of parallel batch processing machines with unequal job ready times. Expert Systems with Applications 39 (1), 2012, pp. 1451–1458.

Damodaran, P.; Vélez-Gallego, M.C.; Maya, J.: A GRASP approach for makespan minimization on parallel batch processing machines. Journal of Intelligent Manufacturing 22 (5), 2011, pp. 767–777.

Fowler, J.; Phillips, D.; Hogg, G.: Real-time control of multiproduct bulk-service semiconductor manufacturing processes. Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on 5 (2), 1992, pp. 158–163.

Fowler, J.W.; Hogg, G.L.; PHILLIPS, D.T.: Control of multiproduct bulk server diffusion/oxidation processes. Part 2: multiple servers. IIE Transactions 32 (2), 2000, pp. 167–176.

Glassey, C.; Weng, W.: Dynamic batching heuristic for simultaneous processing. Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on 4 (2), 1991, pp. 77–82.

Graham, R.; Lawler, E.; Lenstra, J.; Rinnooy Kan, A.: Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey, in: Hammer, P.L., Johnson, E., Korte, B. (Eds.), Discrete Optimization II Proceedings of the Advanced Research Institute on Discrete Optimization and

Systems Applications, Aha. and Vancouver. Elsevier Science, 1979, pp. 287–326.

Gupta, A.K.; Sivakumar, A.I.: Optimization of due-date objectives in scheduling semiconductor batch manufacturing. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (12–13), 2006, 1671–1679.

Habenicht, I.; Mönch, L.: Simulation-based assessment of batching heuristics in semiconductor manufacturing, in: Chick, S.E., Sanchez, P.J., Ferrin, D.M., Morrice, D.J. (Eds.), Proceedings of the 35th Winter Simulation Conference. ACM, 2003, pp. 1338–1345.

Hansen, P.; Mladenovi´c, N.M.; Brimberg, J.; P´erez, J.A.M.: Variable Neighborhood Search, in: Gendreau, M., Potvin, J.-Y. (Eds.), Handbook of metaheuristics, 2nd. New York: Springer 2009.

Hopp, W.J.; Spearman, M.L.: Factory physics. Foundations of manufacturing management, 2 ed. Boston: Irwin/McGraw-Hill 2001.

Jula, P.; Leachman, R.C.: Coordinated Multistage Scheduling of Parallel Batch-Processing Machines Under Multiresource Constraints. Operations Research 58 (4-Part-1), 2010, pp. 933–947.

Kashan, A.H.; Karimi, B.; Jenabi, M.: A hybrid genetic heuristic for scheduling parallel batch processing machines with arbitrary job sizes. Computers & Operations Research 35 (4), 2008, pp. 1084–1098.

Kim, Y.-D.; Joo, B.-J.; Choi, S.-Y.: Scheduling Wafer Lots on Diffusion Machines in a Semiconductor Wafer Fabrication Facility. Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on 23 (2), 2010, pp. 246–254.

Klemmt, A.; Weigert, G.; Almeder, C.; Mönch, L.: A comparison of MIP-based decomposition techniques and VNS approaches for batch scheduling problems, in: Rossetti, M.D., Hill, R.R., Johansson, B., Dunkin, A., Ingalls, R.G. (Eds.), Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2009, pp. 1686–1694.

Klemmt, A.; Weigert, G.; Werner, S.: Optimisation approaches for batch scheduling in semiconductor manufacturing. European Journal of Industrial Engineering 5 (3), 2011, pp. 338–359.

Li, L.; Qiao, F.; Wu, Q.: ACO-Based Scheduling of Parallel Batch Processing Machines with Incompatible Job Families to Minimize Total Weighted Tardiness, in: Dorigo, M., Birattari, M., Blum, C., Clerc, M., Stützle, T., Winfield, A. (Eds.), Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence. Springer 2008, pp. 219–226.

Malve, S.; Uzsoy, R.: A genetic algorithm for minimizing maximum lateness on parallel identical batch processing machines with dynamic job arrivals and incompatible job families. Computers & Operations Research 34 (10), 2007, pp. 3016–3028.

Mathirajan, M.; Sivakumar, A.I.: A literature review, classification and simple meta-analysis on scheduling of batch processors in semiconductor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 29 (9), 2006, pp. 990–1001. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-005-2585-1.

Mladenović, N.; Hansen, P.: Variable neighborhood search. Computers & Operations Research 24 (11), 1997, pp. 1097-1100.

Mönch, L.; Almeder, C.: Ant Colony Optimization for Scheduling Jobs with Incompatible Families on Parallel Batch Machines, in: Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Scheduling Conference (MISTA), 2009, pp. 106–114.

Mönch, L.; Balasubramanian, H.; Fowler, J.W.; Pfund, M.E.: Heuristic scheduling of jobs on parallel batch machines with incompatible job families and unequal ready times. Computers & Operations Research 32 (11), 2005, pp. 2731–2750.

Mönch, L.; Fowler, J.W.; Mason, S.J.: Production planning and control for semiconductor wafer fabrication facilities. Modeling, analysis, and systems. New York: Springer 2013.

Ovacik, I.M.; Uzsoy, R.: Rolling horizon procedures for dynamic parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times. International Journal of Production Research 33 (11), 1995, pp. 3173–3192.

Raghavan, N.S.; Venkataramana, M.: Scheduling Parallel Batch Processors with Incompatible Job Families Using Ant Colony Optimization, in: Proceedings of the International Conference on Automation Science and Engineering, Shanghai 2006, pp. 507–512.

Reichelt, D.; Mönch, L.: Multiobjective Scheduling of Jobs with Incompatible Families on Parallel Batch Machines, in: Gottlieb, J., Raidl, G.R. (Eds.), Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer 2006, pp. 209–221.

Sha, D.; Hsu, S.-Y.; Lai, X.: Design of due-date oriented look-ahead batching rule in wafer fabrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 35 (5-6), 2007, pp. 596–609.

SOLOMON, L.; Fowler, J.W.; Pfund, M.; JENSEN, P.H.: The inclusion of future arrivals and downstream setups into wafer fabrication bath processing decisions. Journal of Electronics Manufacturing 11 (02), 2002, pp. 149–159.

van der Zee, D.J.: Dynamic scheduling of batch-processing machines with non-identical product sizes. International Journal of Production Research 45 (10), 2007, pp. 2327–2349.

Wang, H.-M.; Chou, F.-D.: Solving the parallel batch-processing machines with different release times, job sizes, and capacity limits by metaheuristics. Expert Systems with Applications 37 (2), 2010, pp. 1510–1521.

Yugma, C.; Dauzere-Peres, S.; Derreumaux, A.; Sibille, O.: A Batch Optimization Solver for diffusion area scheduling in semiconductor manufacturing, in ASMC 2008. IEEE/SEMI 2008, pp. 327–332.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Real life evaluation of a model-based combined dispatching approach at a low-volume high-mix ASIC facility

Praxisbezogene Anwendung und Auswertung eines modellbasierten kombinierten Dispatchansatzes in einer niedervolumigen Halbleiterfabrik mit hohem Produktmix

Mike Gißrau, X-FAB Dresden, Dresden (Germany), mike.gissrau@xfab.com
Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany), oliver.rose@unibw.de

Abstract: The fabrication of semiconductor devices, even in the area of customer oriented business, is one of the most complex production tasks in the world. A typical wafer production process consists of several hundred steps with numerous resources including equipment and operating staff. Smaller foundries with a high product mix and a low technology volume need reasonable assignments of each limited resource at each time. Several requirements defined by the process requirements, customers and management must be taken into consideration with the objective to find the best trade-off between the different needs. In this paper, we describe the practical assessment of a combined dispatching policy presented in Gißrau and Rose (2012). Besides the facility performance influence, also the human factor is taken into consideration. This includes dispatch compliance parameters and staff surveys.

1 Introduction

A typical application specific semiconductor facility, also called foundry, has a very complex production process. A wide range of different process steps at a characteristic re-entrant material flow makes wafer fabrication and production control very complex. A performance degradation of various facility KPI (Key Performance Indicators) is caused by the large amount of variability during processing like equipment failures or missing operator attendance. Therefore, a reasonable production control is vital for this business.

The wide diversification of different requirements at a typical foundry like a stable on-time delivery and short cycle times necessitate an intelligent approach for controlling the whole factory production process.

In the literature, a wide range of different scheduling and dispatching approaches can be found, often with a focus on mass production or academic examples. Scheduling as described in Pindeo (2002) is quite hard to be implemented and used in a high-mix low-volume facility. Due to the large amount of variability, the schedule's lifetime is very low, which requires a steady recalculation. Grupta et al. (2002) introduced a multiobjective scheduling approach with respect to variable objective targets, which is also not applicable at our case.

In this area, dispatching is quite common. Different techniques beginning with the definition of simple policies like in Rose (2001, 2002, and 2003) are known. However there can also be found more complex ones (like Dabbas et al. 2001), Bagchi et al. (2008)) taking different criteria into account, with focus on automated mass production with a low product mix. The influence of these rules is often not obvious and depends on the field of application (e.g. see Mittler et al. 1999).

In case of high-mix low-volume semiconductor facilities with manual operations, these dispatching approaches often tend to prioritize only one of the interesting facility performance parameters. The fast change of the product mix and a considerable amount of different new technology introductions cause a very unstable WIP (Work In Process). Therefore a dispatching approach is required where the current facility state is taken into account (e.g. current tool downs, operator attendance and qualification). Furthermore optimization targets can be changed on the fly, e.g., by changing the focus from on-time delivery to cycle time.

2 Theoretical background

In this section, we introduce the theoretical background of the combined dispatch policy as a short review of the approach presented in Gißrau and Rose (2012).

2.1 The combined dispatching policy

In the semiconductor foundry business, a wide range of concurrent requirements defined by the technological background, the customer and the management exists. In many cases, the requirements affect each other.

Common facility KPIs at semiconductor manufacturing are the on-time delivery and the cycle timer per mask layer. Focussing on only one parameter and its optimization is not sufficient to fulfil all requirements and finding the best trade-off between the different needs.

The combined dispatching policy consists of a variable set of different single-objective dispatching policies. The goal is to find the best trade-off between the different requirements for the fab. The rule set is combined in a linear way to find the best compromise between the different needs.

The determination of the weights is realized by a detailed facility simulation model. The simulation model is feed by data from the facility data warehouse including different data sources like MES (Manufacturing Execution System) or ERP (Enterprise Resource Planning) system.

A genetic algorithm calculates the weight for each dispatching rule by an objective function. This objective function is defined by the management and the logistics department and changes over time, depending on the needs and requirements of the

different customers. The optimization is run periodically at different times of the day.

Different simulation studies (see Gißrau and Rose 2012) show positive effects on various facility performance KPIs like cycle time per mask layer within an improvement up to 8% in comparison to the former applied optimized FIFO policy. The tardiness of the lots, which is one of the most important KPI in the foundry business, could be successfully reduced by about 5%.

The whole approach is illustrated in Figure 1.

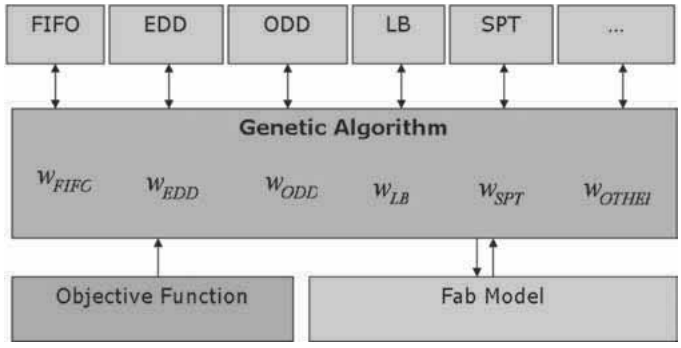


Figure 1: *The combined dispatching approach*

2.2 System implementation

Implementation and introduction of a new system in a running facility is a difficult task. The inhomogeneous IT infrastructure and the different expectations of the operating personal are barriers to be overcome.

In a historically grown IT infrastructure, a wide range of different data sources are in use. For the application of a simulation model and real-time dispatching, these data sources have to be accessed in a stable and reasonable way. Figure 2 illustrates the general environment.

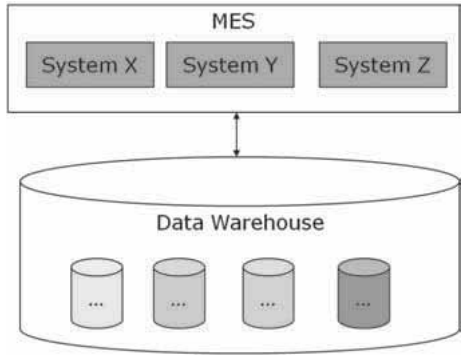


Figure 2: *Data resources*

The steady change of software solutions of the IT landscape caused by software replacements and updates force us to use an independent application structure. For this, the usage of web services is preferred. This allows a flexible and independent access to the required methods of the application. The system is implemented with the programming language JAVA, which leads to a stable solution. The application is divided into two parts:

- *Real Time Dispatcher:* The real time dispatcher is responsible for dispatch list generation for the different equipment and the lot priority update at lot movements. Due to the real time requirements of this operation, the time consumption of the different method calls should be very low.
- *Simulation and Optimization:* The simulation and optimization core is responsible for calculating the new weight combinations according the genetic algorithm. For that, a detailed facility model is generated from the data ware house.

A data structure is established to obtain a standardized access to the required data of the data warehouse. This data structure is filled by various different data sources with online and offline data. Figure 3 illustrates the system overview.

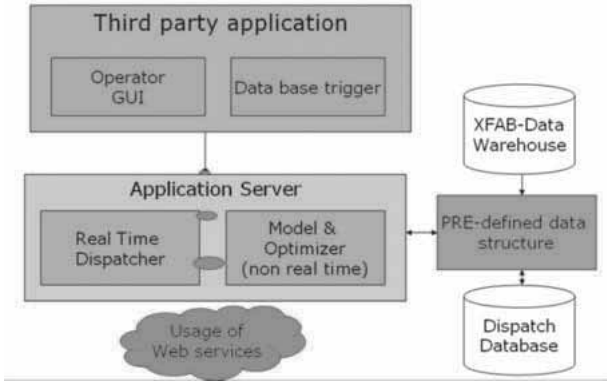


Figure 3: *Application overview*

3 Practical evaluation

This section illustrates the practical assessment of the combined approach at a high-mix low-volume ASIC facility. During the four month test period, the whole dispatching of the fab is realized by the new application using the combined approach. The test period ranges between September 2012 and December 2012.

3.1 Facility KPI results

During the evaluation period, the dispatching system had a positive influence on the facility performance behavior; especially the variance of different facility performance parameters could be successfully reduced.

Figure 4 shows the absolute S-Curve for the cycle time per mask layer without any normalization. The interesting quarters of the year 2012 are Q3 and Q4. In Q1 and

Q2, the technology mix and the facility load changed, therefore only Q3 and Q4 could be compared, because the boundary conditions were the same.

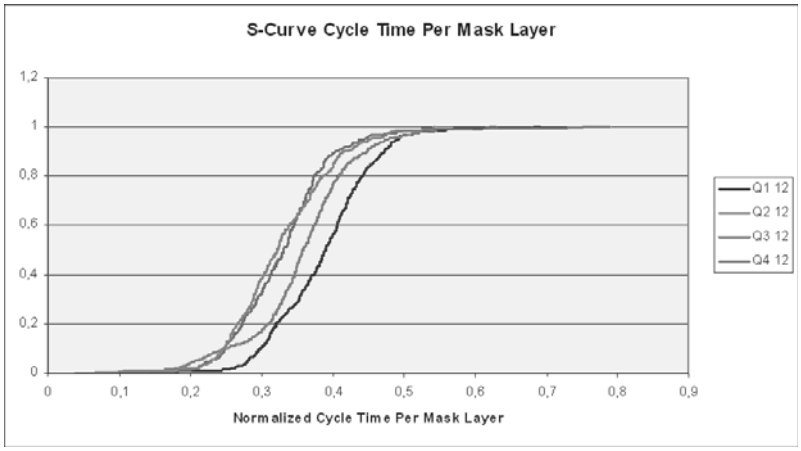


Figure 4: *Cycle time per mask layer over all technologies without normalization*

The positive effect takes place at Q4, after a considerable period without visible changes due to the average processing duration of two to three month for one lot. At the lower border, the increases of the curves in Q3 (first effects of dispatch control) and Q4 are much sharper than in Q1 and Q2. That indicates a better management of faster and slower lots. Before the dispatch algorithm starts, lots are sometimes delivered too early whereas lots with strength due date ware delivered too late.

A further effect can be seen around the median of the curve. The absolute cycle time value could be successfully reduced by 5%. The worse values at the upper end of the curve are caused by production problems rather than by the dispatch control system.

Figure 5 illustrates the S-Curves of the cycle time per mask layer after normalization of the absolute values. Often, different technologies have different cycle time per mask layer distributions due to processing reasons. After elimination of this effect, the positive influence becomes more obvious. Besides a sharper increase, also the distribution values of Q4 are lower than of Q3.

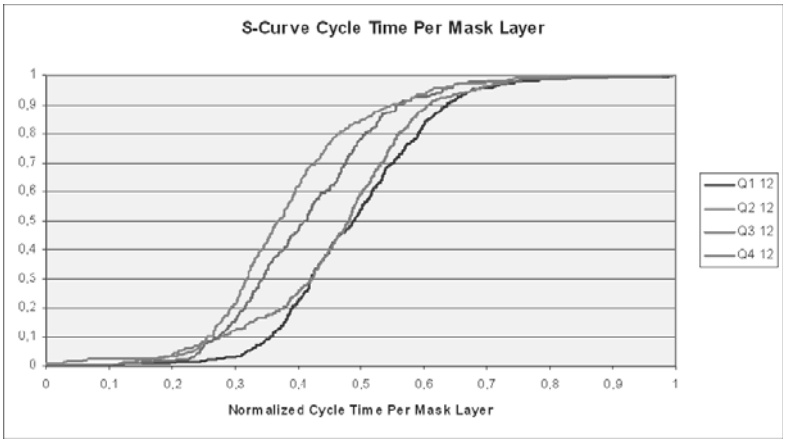


Figure 5: *Cycle time per mask layer over all technologies with normalization*

3.2 System performance results

The performance of the system is vital for the acceptance of the system by the operating personal. To that end several performance parameters were analyzed during the evaluation period. The most vital performance parameter is the time consumption of the dispatch list generation. Because this is a online task, the operator has to wait this time until he can take the next lot for processing. Figure 6 illustrates the statistics for this case.

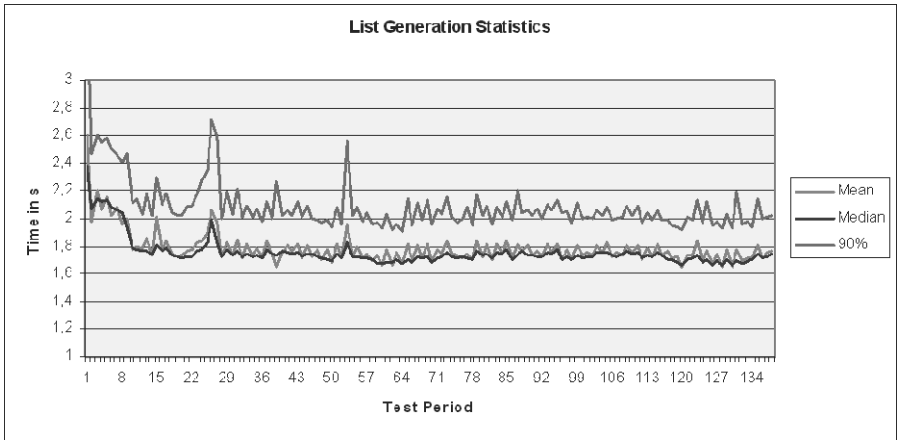


Figure 6: *Dispatch list generation statistics*

The median value is about 1.7 seconds, whereas the 90\% value is around 2 seconds. The 90\% value represents the main statistical output for our needs. Values above 3 seconds are not accepted by the operating staff. The largest amount of time is caused by detecting the right lots for the equipment rather than by the dispatch algorithm

itself. This process also includes the interaction with the MES by various system method calls.

3.3 Dispatch compliance

The dispatch compliance is a vital parameter for the acceptance of the whole approach by the operating staff. Due to the huge amount of manual interaction in the production process, the operator also has to choose the next lots for processing. The operating staff is forced to take the first lot or batch from the generated dispatching lists.

Thus, several statistical analyses were carried out to obtain an overview about the compliance level at the facility. The parameter **i** describes the position of each lot or batch in a dispatch list with *N* lots or batches. We define different compliance parameter, e.g.:

- *Compliance Score:* The compliance score P_C is a declarative value for estimating the dispatch compliance. The value ranges between 0 and 1, where the target value is 1.

$$P_C = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ \dfrac{N-i}{N} & 1 < i < N \\ 0 & i = N \end{cases}$$

- *Absolute Dispatch Compliance:* The absolute dispatch compliance P_A describes the absolute fulfillment of the dispatch list.

$$P_A = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

- *Average Sort Index:* The average sort index P_S describes the average lot or batch position taken from the list.

$$P_S = i$$

- *Correlation:* For evaluation purposes, the correlation P_{CORR} between the waiting time T_{LOT} of a lot and its priority P_{LOT} is an interesting measure how the priority of a lot affects its waiting time.

$$P_{CORR} = CORR(T_{LOT}, P_{LOT})$$

Figure 7 illustrates the range of values of each proposed compliance parameters.

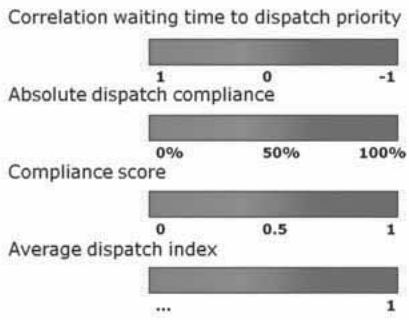


Figure 7: *Compliance parameter overview*

The compliance parameters are collected after each 12 hour work shift. In our case, four teams are available switching between night and day shift. Figure 8 illustrates the compliance score and the correlation value for the four shifts over one part of test period.

The compliance score ranges between 0.55 and 0.68 during the test period, with a positive trend to a higher dispatch compliance. The committed target for this value is P_C=0.75. Several reasons for the partial fulfillment of this target are known:

- Manual batch transport of lots between clusters: Lots are physically not available at the next operation but waiting for transport due to the manual transport system. The information of the current physical lot position is not available.
- Work organization: Several small storage buffers in front of the equipment lead to preference of FIFO processing. Operators tend to use lots in their direct environment rather than taking lots from storage places far away.
- Equipment characteristics: Cluster tools requiring special order of lots according the recipe properties. Often cluster tools are not fully represented in the MES. Information about several process areas in the tool are only partially available.

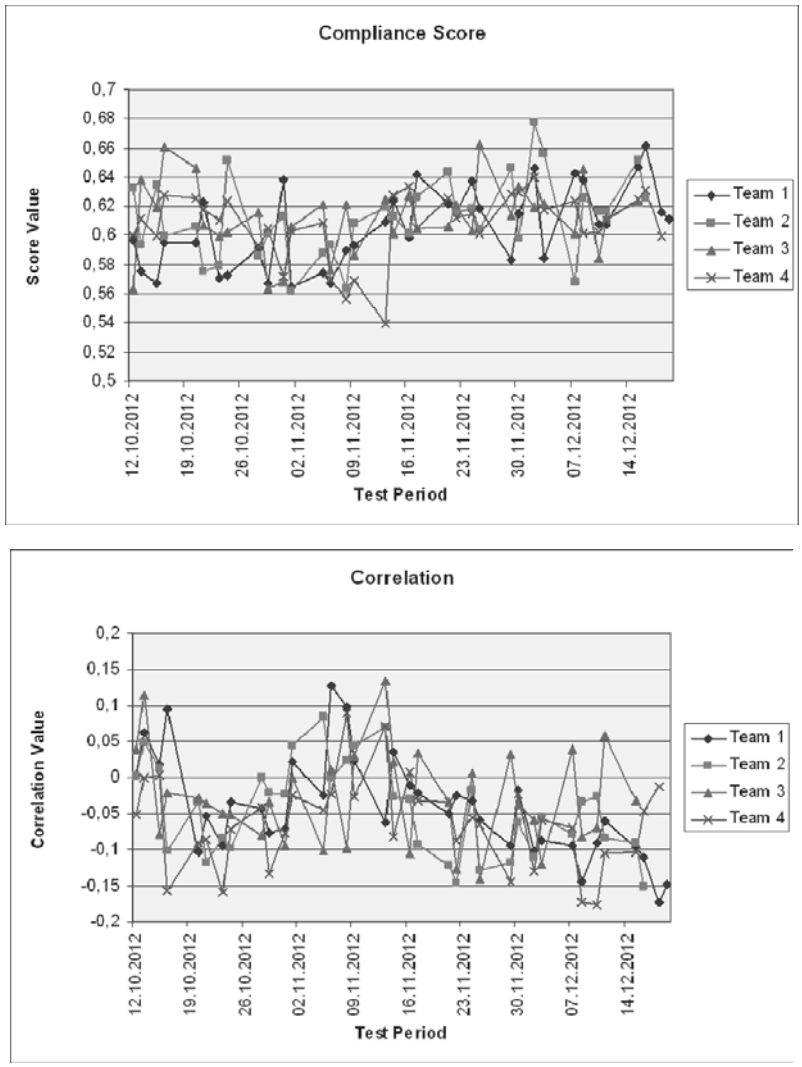


Figure 8: *Compliance score and correlation*

The correlation between the waiting time of the lot and its priority shows a small negative correlation with a negative trend. We expected a higher negative correlation. Reasons for the low negative correlation could be found at low utilized equipment where only a small amount of lots are processed. Often operators are not available at these tools. Therefore single lots with higher priority have to wait.

In general, the compliance analysis offers several improvement possibilities according the work organization and the available data. Several projects are started to increase the dispatch compliance, ranging from operator training to data source improvements.

3.4 Staff survey

After the end of the test period, a web based staff survey was conducted to obtain an overview about the personal opinions from leading staff. The questions were divided into three areas:

1. Evaluation of the current FIFO dispatching procedure
2. Opinions about improvements and required changes for the current dispatching system
3. Evaluation of the new dispatching procedure

The period for the survey was set to 14 days. The survey was completed by 12 persons. These persons included the shift leader and the dispatching personal. The following points show the main results of the survey:

- 11 persons characterize the FIFO policy and the manual priorities as not sufficient for the foundry business with high-mix low-volume characteristics. All persons rate the existing policy worse than 2 (1…perfect, 6…worst case), 5 worse than 3
- All persons rate the need of automated production control systems as very important. 11 persons see the need for a new production control approach
- 9 persons evaluate the dispatching lists as more reasonable. 8 persons see the new approach as a useful improvement. 10 persons rate the new policy better than 3 (1…perfect, 6…worst case).

4 Conclusions

In this paper, we consider the practical assessment of a combined dispatching policy for a typical high-mix low-volume ASIC facility. The combined approach shows an average improvement of the common factory performance parameters like cycle time per mask, the work in process or the on-time delivery of about 3% to 5% compared to former quarters during the test period.

The system performance estimates collected during the test period show sufficiently low time consumptions of the method classes like dispatch list generation.

The dispatch compliance analysis shows improvement potential in the area of operator training, work organization and data source management.

In general, the proposed dispatch approach became an accepted tool for a more efficient production control in our fab.

References

Bagchi, S.; Chen-Ritzo, C.; Shikalgar, S.T.; Toner, M.: A full-factory simulator as a daily decision-support tool for 300mm wafer fabrication productivity, in Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler eds., pp. 2021-2029, 2008.

Dabbas, R.M.; H.-N. Chen; J.W., Fowler; D. Shunk.: “A Combined Dispatching Criteria Approach to Scheduling SemiconductorManufacturing Systems”. Computers and Industrial Engineering 39 2001, 307–324.

Gißrau, M.; Rose, O..: “Development and Introduction of a Combined Dispatching Policy at a High-Mix Low-Volume ASIC Facility”. In Proceedings of the Winter

Simulation Conference, edited by C. Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, and A. M. Uhrmacher 2012.

Gupta, A.; Sivakumar, A.: Simulation based multiobjective Schedule Optimization in Semiconductor Manufacturing, in Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes eds., pp. 1862-1870 2002.

Mittler, M.; Schoemig, A.K.: "Comparision of DispatchingRules for Semiconductor Manufacturing Using Large Facility Models". In Proceedings of the Winter Simulation Conference, edited by P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans, 709–713, 1999.

Pinedo, M.: Scheduling Theory, Algorithms, and Systems. 2nd ed. Prentice-Hall, Inc 2002.

Rose, O.: "The Shortest Processing Time First Dispatch Rule and some Variants in Semiconductor Manufacturing". In Proceedings of the Winter Simulation Conference, edited by B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, and M. W. Rohrer, 1220–1224., 2001.

Rose, O.: "Some Issues of the Critical Ratio Dispatch Rule in Semiconductor Manufacturing". In Proceedings of the Winter Simulation Conference, edited by E. Y¨ ucesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes, 1401–1405, 2002.

Rose, O.: "Accelerating Products under Due Date Oriented Dispatching Rules in Semiconductor Manufacturing". In Proceedings of the Winter Simulation Conference, edited by S. Chick, P. J. Snchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, 1346 – 1350, 2002.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Serviceorientierte Referenzarchitektur für Logistische Assistenzsysteme zur simulationsbasierten Entscheidungsunterstützung

Service oriented reference architecture for logistic assistance systems for simulation based decision support

Josef Kamphues, Sven Groß, Benjamin Korth, Markus Zajac, Tobias Hegmanns,
Fraunhofer IML, Dortmund (Germany), Josef.Kamphues@iml.fraunhofer.de,
Sven.Gross@iml.fraunhofer.de, Benjamin.Korth@iml.fraunhofer.de,
Markus.Zajac@iml.fraunhofer.de, Tobias.Hegmanns@iml.fraunhofer.de

Abstract: This paper describes a technical architecture which enables companies to easily implement simulation technologies into their business processes. To verify the operational readiness of the architecture simulation based planning methods for supply chain planning and execution are developed and implemented as prototype service modules. These service modules can be flexibly adapted to the requirements of different companies and therefore used in different planning tasks. The results are based on the research projects Supply Chain Planning (SCP) and Supply Chain Execution (SCE) which are part of the EffizienzCluster LogistikRuhr.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren ist die Nutzung von Informationstechnik, insbesondere die Verwendung von Internetdiensten, immer wichtiger für die effiziente Gestaltung, Planung und Steuerung von Produktions- und Lieferketten geworden. Durch die Verbindung von Unternehmen zu Wertschöpfungsnetzwerken sind neue Herausforderungen entstanden. Zum einen sind große Datenmengen zu beherrschen, und zum anderen ist die Komplexität der Daten um ein Vielfaches gestiegen (vgl. Klingebiel et al. 2010). Die heutige IT-Systemlandschaft in der Logistik ist jedoch von starren und monolithischen Planungs- und Steuerungssystemen geprägt. „Standardlösungen“ stellen entweder nicht alle individuellen Unterstützungsfunktionen für ein spezifisches Unternehmen bereit oder müssen aufwändig angepasst werden. Als Ausweg werden deshalb häufig MS Excel, MS Access oder vergleichbare Programme als Planungsalternativen hinzugezogen, was letztendlich zu einer parallelen Systemlandschaft bzw. Planungsinseln führt. Ist dies nicht gewünscht, bleibt nur die Entwicklung von aufwendigen und teuren Individuallösungen durch spezialisierte IT-Dienstleister, welche erhebliche

Vorlaufzeiten für die Entwicklungs-, Implementierungs- und Anlaufphasen erfordern. Entsprechend inflexibel und teuer sind diese Systeme an den ständigen Wandel der Unternehmen anzupassen. Mit dem Ziel die Informationen in Produktions- und Lieferprozessen zu verwerten und im Voraus Planungsentscheidungen zu überprüfen, werden unter anderem Simulationen eingesetzt. Zur Nutzung von Simulationstools werden jedoch Modelle notwendig, welche bei der Erstellung häufig die Integration von Daten aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen benötigen. Erschwerend kann hinzukommen, dass die späteren Nutzer der Simulation bzw. der Simulationsergebnisse weitläufig in der Organisation verteilt sind. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit kollaborative Ansätze zu verfolgen, um die verschiedenen Nutzer adäquat einbinden zu können. Die Verbreitung kollaborativer Simulationswerkzeuge in Wertschöpfungsnetzwerken ist jedoch eher gering einzuschätzen (vgl. Straßburger et al. 2008).

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept greift aktuelle Ansätze zur Entscheidungsunterstützung durch Simulation auf (siehe Kapitel 2) und kombiniert sie mit einem innovativen Ansatz zur flexiblen und kostengünstigen Gestaltung von Logistik-IT-Systemen in Form serviceorientierter web-basierter Logistischer Assistenzsysteme. Dies ermöglicht es Simulationen aufwandsarm in die operativen und taktischen Planungs- und Steuerungssysteme einzubinden. Wesentliche Kriterien sind dabei die individuelle Adaptierbarkeit der Simulation sowie die Gewährleistung einer intuitiven Mensch-Maschine-Interaktion. Aktuelle IT-Technologien (bspw. Cloud Computing und SOA) können an dieser Stelle helfen, die Simulationskomponente anwenderfreundlich sowie kostengünstig in Planungs- und Steuerungssysteme zu integrieren und bedarfsgerecht bereitzustellen. Durch die Nutzung dieser IT-Technologien können viele Aspekte, welche die Komplexität von Simulationsmodellen ausmachen (bspw. Aufbau und Parametrierung), hinter intuitiv bedienbaren Frontends verborgen werden. Darüber hinaus können unterschiedliche Benutzer in verschiedenen Abteilungen Daten und Parameter der Simulation verändern und so gemeinsam ein Simulationsmodell kalibrieren. Eine service-basierte Simulation wird dieser Anforderung in technischer Hinsicht gerecht, da sie eine verteilte kooperative Erstellung und Nutzung von Simulationsmodellen ermöglicht. Den mit der Simulation einhergehenden technischen Anforderungen hinsichtlich Rechner- und Speicherleistung wird mithilfe eines cloudfähigen Ansatzes ebenfalls begegnet. Je nach Simulationsumfang können so die benötigten Rechenleistungen abgerufen und die kostenintensive Rechnerressource durch viele Nutzer gleichsam effizient genutzt werden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Ab einer gewissen Größe werden die Geschäftsprozesse eines Unternehmens in aller Regel mithilfe von Informationstechnologie unterstützt. Dabei sind Software für Produktionsplanung und -steuerung, Enterprise Resource Planning, Supply Chain Management und Advanced Planning System häufige Ausprägung von Systemen zur IT-Unterstützung in der Logistik (vgl. Schönsleben 2011). Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) stellen ebenfalls computergestützte Planungs- und Informationssysteme dar, welche jedoch nicht nur Informationen filtern, aggregieren und darstellen, sondern den Planungs- und Entscheidungsprozess in solch einer Form unterstützen, dass die Entscheidungsqualität des Nutzers

verbessert wird. In der Praxis werden zur Entscheidungsfindung in der Prozessplanung und -steuerung verschiedene Werkzeuge und Methoden (z.B. Datenbanken, MS Excel, Simulationen) lokal und unabhängig eingesetzt. Durch diese parallele Systemlandschaft resultiert eine kritische Inkonsistenz zwischen operativen Unternehmenssystemen und der realen Planungs- und Steuerungswelt (vgl. Klingebiel 2010).

Die Weiterentwicklung der EUS, bspw. um diese in bestehende Geschäftsprozesse und IT-Systeme zu integrieren, führte zur Etablierung von Assistenzsystemen. Die in vielen Bereichen (wie bspw. Standortplanung, Produktionsplanung, Auftragsabwicklung, vgl. Hellingrath und Kuhn 2002) eingesetzten Logistischen Assistenzsysteme (LAS) sind rechnerbasierte Systeme, die den Menschen bei der Entscheidungsfindung und -umsetzung unterstützen und stellen einen integralen Bestandteil der Mensch-Maschine-Systemtechnik dar (vgl. Timpe und Jürgensohn 2002). Dabei fokussieren die LAS i.d.R. spezielle Vorhaben und nutzen dabei unterschiedlichste Bewertungsmethoden, um Entscheidungsunterstützung zu bieten.

Der Anforderung, Unternehmenssoftware immer wieder neu an die Prozesse und Aufgaben im Unternehmen anzupassen, kann mit einem Serviceorientierten Ansatz, der es erlaubt Softwaresysteme zu modularisieren, effektiv begegnet werden (vgl. Schönsleben 2011). Durch lose gekoppelte und interoperable Services können Anwendungen flexibel konfiguriert und parallele Systemlandschaften vermieden werden. Zusätzlich lassen sich Services leicht auf entfernte Serversysteme oder in Cloud-Plattformen auslagern, wodurch zusätzliche Rechenleistung zu Verfügung steht. Das Vorantreiben der Modularisierung lässt sich ebenfalls bei den Softwareherstellern wie SAP und Oracle beobachten (vgl. Erkayhan 2011).

Entscheidungsalternativen sind in vielseitigen und unternehmensübergreifenden Prozessketten oft nicht mit statischen Verfahren bewertbar. Daher werden Simulationen eingesetzt, mit denen die Dynamik der Prozesse untersucht werden kann (vgl. Hellingrath und Kuhn 2002). Die Bandbreite von Simulationswerkzeugen reicht von allgemeinen Programmiersprachen bis hin zu anwendungsspezifischen Simulatoren, die zwar nur in einem bestimmten Anwendungsbereich verwendet werden können, dort aber ihre Verwendung durch mitgelieferte und anwendungsnahe Bausteine erleichtern. Der Simulator OTD-NET, der in den Arbeiten im Kontext dieses Beitrags eingesetzt wird, ist am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik entwickelt worden, ermöglicht die ereignisgesteuerte Netzwerk-Simulation und findet u.a. Anwendung im Rahmen der dynamischen Bewertung von unternehmensübergreifenden Prozessen in der Automobilindustrie (vgl. Wagenitz 2007). Weitere Beispiele zu verschiedenen Simulationswerkzeugen in der Logistik finden sich u. A. in Eley (2012). Alle diese Simulatoren werden typischerweise als Stand-Alone-Werkzeuge auf lokalen Rechnerressourcen eingesetzt. Die Simulationswerkzeuge sind in vielen Fällen gar nicht, zumindest aber nicht besonders eng, in die operativen Planungs- und Entscheidungsprozesse eingebunden. Vielmehr ist die Simulation eher eine mit Projektcharakter eingesetzte Methode zur Lösung fallspezifischer Fragestellungen (vgl. Kuhn et al. 2010).

Des Weiteren nimmt die sequentielle Simulation großer und komplexer Systeme viel Zeit in Anspruch. Abhilfe schaffen bspw. verschiedene Ansätze zur Parallelisierung der Simulation. Im einfachsten Fall werden unabhängige Simulationsläufe mit verschiedenen Parametern auf unterschiedlichen Recheneinheiten durchgeführt. Weitere Möglichkeiten sind die funktionale Parallelisierung oder die Aufteilung des Modells (vgl. Seibold 2002).

3 Methodisches Konzept zur simulationsbasierten Entscheidungsunterstützung

Das hier beschriebene Konzept nutzt die Ergebnisse der Projekte aus dem Leitthema „Logistics-as-a-Service“ des EffizienzCluster LogistikRuhr (vgl. EffizienzCluster Management GmbH 2013). Die Arbeiten zielen auf die Entwicklung eines IT-Baukastens für logistische Entscheidungsunterstützungssysteme. Das Konzept des IT-Baukastens ermöglicht es, sowohl Domänen der Logistik, wie bspw. die Entscheidungsvorbereitung und der -unterstützung (zu welcher auch die Simulation gehört), in fachliche Services zu kapseln, als auch technische Bereiche in Form von Kommunikations- und Infrastrukturservices zur Verfügung zu stellen. Durch die Nutzung der wiederverwendbaren Services aus dem Baukasten (Abb. 1) und deren Verknüpfung lassen sich individuelle logistische Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung in Produktions- und Lieferketten konfigurieren (vgl. Steinbuß et al. 2012).

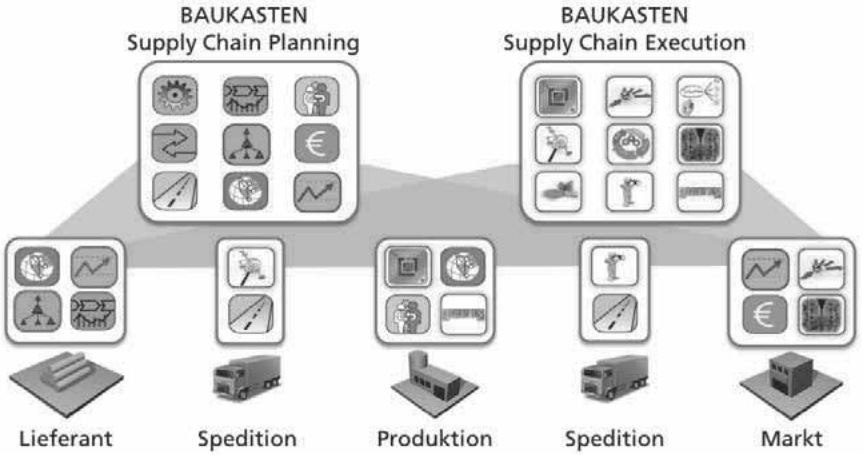


Abbildung 1: *Individuell adaptierbare logistische Assistenzsysteme [eig. Darst.]*

Für die individuelle Komposition von Assistenzsystemen wird eine serviceorientierte Referenzarchitektur eingeführt. Diese stellt sowohl die Komponenten (hier Services) eines Softwaresystems (hier Assistenzsystem) als auch deren Beziehungen und die Aufgabenteilung zwischen diesen Komponenten idealisiert dar (vgl. Großmann und Koschek 2005). Die technische Grundlage dieser serviceorientierten Referenzarchitektur bilden SOA-Konzepte (Josuttis 2007) sowie das Software-as-a-Service-Modell des Cloud-Computing (Baun et al. 2011). Über Cloud-Plattformen,

wie die Logistics Mall (Holtkamp et al. 2010), können individuelle Assistenzsystemlösungen dann (auch kleinen) Unternehmen kostengünstig zur Verfügung gestellt werden.

Die hier beschriebene serviceorientierte Referenzarchitektur bildet den Lösungsansatz zur Umsetzung der simulationsbasierten Entscheidungsunterstützung für die Anwendungsfälle in Kapitel 4. Die Komponenten dieser Architektur haben daher einen starken Anwendungsbezug und bestehen im Wesentlichen aus

- Services zur Planung, welche Parameter des Simulationsmodells modifizieren (vgl. „Stock Strategy Planner“ und „Target Stock Calculator“ in Kapitel 4.1), um verschiedene Planungsszenarien bei der Simulation zu berücksichtigen,
- dem Simulation Service (vgl. „Network Analyzer“ in Kapitel 4.1),
- dem Reporting Service zur Auswertung der Simulationsergebnisse,
- einem Workflowservice (vgl. Nutzung der Simulation in einem Herstellungsprozess, Kapitel 4.2)
- und einem Infrastrukturservice zur Durchführung der Kommunikation.

Die Services zusammen erlauben es, anwendungsorientierte Logistische Assistenzsysteme zur Durchführung und Auswertung von Simulationsexperimenten bei Planungs- und Steuerungsaufgaben zusammenzustellen. Ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang betrifft die bereits erwähnte Modifikation von Parametern eines Simulationsmodells. Das Simulationsmodell wird lokal erstellt und kann durch einen Service in einer Cloud-Datenbank abgelegt werden. Für die operative Entscheidungsunterstützung ist es sinnvoll die Veränderungen am Simulationsmodell auf ein sinnvolles Maß zu begrenzen. Services (wie bspw. „Stock Strategy Planner“) erlauben ausschließlich zuvor definierte Änderungen, sodass stets ein konsistentes, simulierbares Modell zur Verfügung steht. Alle Nutzer des Assistenzsystems verwenden dasselbe Simulationsmodell und verändern es für ihren Simulationslauf nur innerhalb der definierten Grenzen. Parallele Systemlandschaften mit unterschiedlichen Modellen können auf diese Weise vermieden werden. Damit entstehen Voraussetzungen für die Anwendung von Simulation in operativen Entscheidungsprozessen.

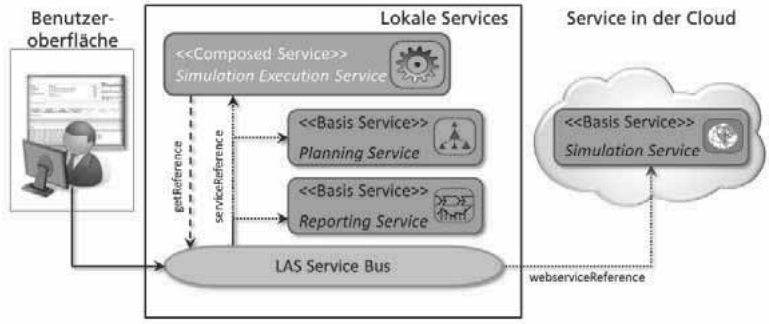


Abbildung 2: *LAS mit Simulation Services [eig. Darst.]*

Bei der Komponente „LAS Service Bus“ handelt es sich um einen Infrastrukturservice zur Abwicklung der Kommunikation zwischen Service-Nutzern und den Services

selbst. Die Services selbst sind in sich abgeschlossen („Basis Services“), der Zugriff auf diese erfolgt über eine definierte Schnittstelle. Dabei können rechenintensive Services in die Cloud ausgelagert werden. Der „LAS Service Bus“ ermöglicht eine einheitliche Kommunikation zwischen den Nutzern und den Services, und zwar unabhängig davon, ob diese lokal oder in der Cloud angesiedelt sind. Hierzu verwaltet der Service Bus die Referenzen auf die unterschiedlichen Services, über welche diese gemäß der Schnittstellenbeschreibung aufgerufen werden können, und bildet somit das Fundament des Assistenzsystems. Der als „Composed Service“ bezeichnete „Simulation Execution Service“ ist als Workflowservice bzw. Prozessautomatisierungsservice zu verstehen. Er gewährleistet bspw. die Überwachung des Status der Simulation und stellt in Abhängigkeit davon außerdem den rechtzeitigen Aufruf des nächsten Prozessschrittes (bspw. Abholen der Simulationsergebnisse und Auswertung der Ergebnisse mit Hilfe des Reporting Service) sicher (Abb. 2).

Der Simulation Service, welcher den OTD-NET Simulator verwendet, wurde im Rahmen des Projektes Supply Chain Planning (SCP, vgl. 4.1) implementiert. Nachfolgend werden die wesentlichen technischen Aspekte des Simulation Service beschrieben. Die Nutzung geschieht gemäß der Schnittstellenbeschreibung, welche in der Web Services Description Language (Web Services Description Language 2013) angegeben wird. Über die Schnittstelle werden folgende Funktionen angeboten:

- *Konfiguration des Simulationslaufes:* Diese Funktion nutzt Geschäftsobjekte (Business Objects) um die verschieden Simulator- und Modellparameter des Simulationslaufes zu konfigurieren, wie bspw. Anzahl der Simulator-Instanzen (paralleler Betrieb) und Angabe des konkreten Simulationsmodells (welches zum Beispiel in einer Cloud-Datenbank abgelegt sein kann). Paralleler Betrieb eignet sich insbesondere dann, wenn mehrere Simulationsläufe mit jeweils unterschiedlichen Simulationsparametern gleichzeitig durchgeführt werden sollen und der Simulation Service in diesem Fall in der Cloud abgerufen wird.
- *Simulationslauf starten und terminieren:* Da die Simulation einen rechen- und zeitintensiven Vorgang darstellt, wird der Simulationslauf asynchron gestartet. Dadurch wird der Blockierung des Systems entgegengewirkt und das System bleibt weiter bedienbar. So kann regelmäßig der Status der Simulation abgefragt oder diese vorzeitig beendet werden. Des Weiteren werden an dieser Stelle parallele Simulator-Instanzen verwaltet und ebenfalls asynchron ausgeführt.
- *Status und Ergebnisse des Simulationslaufes abholen:* Die Abfrage bzgl. des Fortschritts liefert pro Instanz ein Geschäftsobjekt mit Statusinformationen (wie *isReady*, *isPending*, *isRunning*). Wurde für eine Instanz ein Simulationslauf fertiggestellt, dann können die Ergebnisse dieser Instanz via Service-Aufruf abgerufen und dem Reporting Service zur Verfügung gestellt werden.

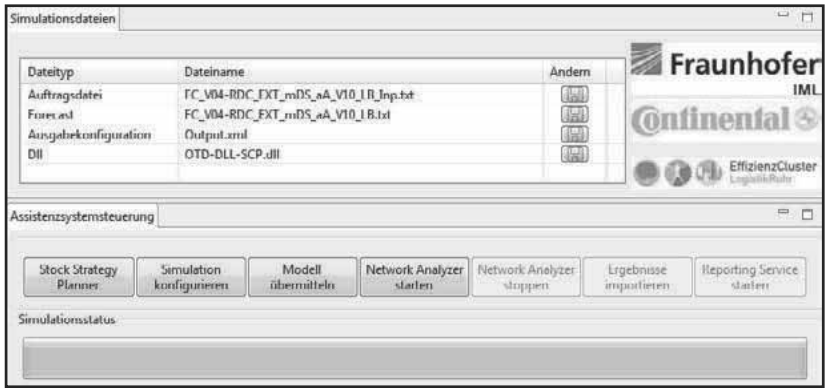


Abbildung 3: *Oberfläche zur Bedienung des Simulation Service [eig. Darstellung]*

- *Bedienung:* Die Bedienung einer Instanz erfolgt über eine Benutzeroberfläche, wie sie bspw. im Projekt SCP realisiert wurde (Abb. 3). Diese steuert den Workflow der konkreten Planungsaufgabe und gewährleistet die intuitive Bedienung des Assistenzsystems und der integrierten Simulationskomponente.

4 Anwendung der Referenzarchitektur

Das beschriebene Konzept für den Einsatz von Simulation in operativen Entscheidungsunterstützungsprozessen wird im Folgenden anhand von zwei Beispielen im Bereich der Supply Chain Planung sowie Auftragssteuerung verdeutlicht. Im Verbundprojekt SCP bieten die auf der Referenzarchitektur basierenden Services simulationsbasierte Planungsfunktionalitäten, die für das Bestandsmanagement in komplexen Produktions-/Distributionsnetzwerken eingesetzt werden können (vgl. Hegmanns und Orlob 2011). Die im Projekt SCE konzeptionell und zu Teilen prototypisch entwickelten Services dienen unter anderem zur Simulation von möglichen Handlungsalternativen bzgl. kurzfristiger Änderungen in der Auftragsabwicklung, die mit echtzeitnahen Informationen aus der physischen Identifikation und Erfassung von Auftragsfortschrittsdaten und Qualitätszuständen rückgekoppelt werden (vgl. Yüzgülec et al. 2012).

4.1 Anwendung der Simulation zur Bestands-, Transport- und Standortplanung

Im Rahmen des Projektes SCP wurde das hier beschriebene Konzept exemplarisch für das Bestandsmanagement in dem europäischen Distributionsnetzwerk der Continental Reifen GmbH umgesetzt. Das Netzwerk umfasst acht Produktionsstandorte, fünf zentrale und 30 regionale Distributionszentren sowie 31 Absatzmärkte. Da die simulierten Artikel (ca. 8000 Stück) starken saisonalen Effekten unterliegen, bietet die Bestandsplanung mit Hilfe der Simulation ein großes Potential, um Fehl- und Überbestände in den einzelnen Regionen zu reduzieren und damit Kosteneinsparungen zu erreichen. Vor allem in der taktischen Planung des Netzwerks ergeben sich viele Fragestellungen, bei der Simulationsexperimente den Planer sinnvoll unterstützen können:

- Welche Bevorratungsstrategie (bspw. regionale oder zentrale Bevorratung) führt für welche Artikelsegmente zu welchen Auswirkungen auf die Artikelverfügbarkeit und den Lieferservice in bestimmten Märkten?
- Welche Konsequenzen ergeben sich für die erforderlichen Kapazitäten in Werks- und Distributionslägern sowie für Transportkapazitäten und –frequenzen aus einer geänderten Absatzplanung?

Das zur Beantwortung dieser Fragen prototypisch entwickelte Assistenzsystem basiert auf der oben beschrieben Referenzarchitektur. Dazu wurden sowohl lokale als auch zentrale Services realisiert. Der „Stock Strategy Planner" dient zum einen der Definition von Artikelclustern. Der Planungsservice bietet dabei die Möglichkeit, die Artikel auf der Grundlage unterschiedlicher Analysen (bspw. ABC- oder RUS-Analyse) zu segmentieren. Zum anderen werden mit diesem Service auf der Grundlage der definierten Artikelcluster individuelle Bevorratungsebenen definiert. Für jede Artikelkategorie kann so eine individuelle Bevorratungsstrategie definiert werden (bspw. regionale Bevorratung für A-Artikel und zentrale Bevorratung für C-Artikel). Mit dem „Target Stock Calculator" kann dann die Berechnung der artikel- und lagerspezifischen Zielreichweiten unter Berücksichtigung der Bestandstrategie und definierter Dispositionsparameter (Ziel-Servicelevel, Bestelllosgröße, Bestellrhythmus etc.) erfolgen. Die Parameter des „Stock Strategy Planner" und des „Target Stock Calculator" werden schließlich an den in die Cloud ausgelagerten „Simulation Service" (hier: „Network Analyzer") übergeben. Aus den Informationen eines Planungsszenarios wird ein Simulationsszenario erzeugt, in dem ein initial erstelltes Basismodell entsprechend parametriert wird. Mit dem vierten Service des Assistenzsystembaukastens („Reporting Service") können die Ergebnisse der Simulationsexperimente zu einem Szenario ausgewertet und aufbereitet werden. Dazu werden zum einen Bestände, Servicelevel und Lieferverzug artikel- und lagerspezifisch ausgewiesen und zum anderen die Simulationsergebnisse in Form von artikel- und relationsspezifischen Kennzahlen zur Transportplanung aufbereitet (Transportfrequenzen, Transportauslastung etc.). Aus diesen Ergebnissen lassen sich somit relevante Kosten- und Leistungskennzahlen ableiten, die dem Planer als Entscheidungsgrundlage dienen (Abb. 4).

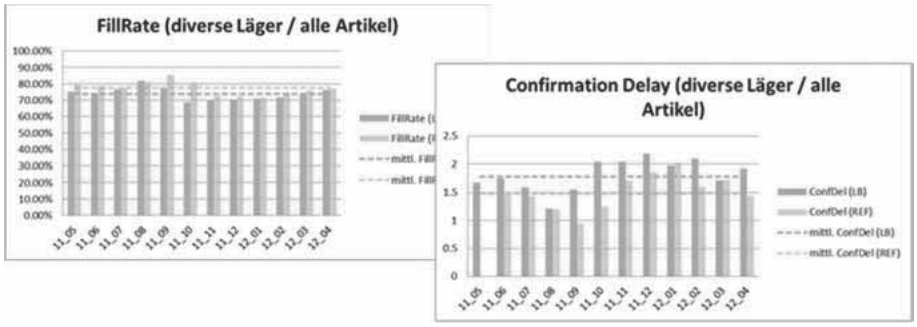


Abbildung 4: *Kennzahlen FillRate (Servicelevel) und Confirmation Delay (Lieferverzug) anhand zweier Simulationsläufe [eig. Darst.]*

4.2 Konzept zur Simulation in der Auftragssteuerung

Im Verbundprojekt SCE wurden individuell adaptierbare Servicebausteine zur dezentralen Entscheidungsunterstützung in der auftragsbezogenen Materialflusssteuerung entwickelt. Die Services sind über mobile Endgeräte abrufbar und wurden exemplarisch für die Möbelindustrie realisiert. Im Anwendungsfall wird die Lieferkette eines Möbelherstellers vom Rohstofflieferanten bis zum Endkunden betrachtet. In der Supply Chain wurden Steuerungspunkte identifiziert, welche eine wirkungsoptimale Absicherung des Materialflusses ermöglichen. Der Einsatz von Simulation unterstützt hier vor allem die fallbezogene Auftrags(um-)steuerung des Produktionsprozesses nach einer negativen Qualitätskontrolle.

Im Herstellungsprozess des Möbelherstellers werden mit RFID-Tags versehene Holzkanteln zu Leimholzbrettern verleimt und an verschiedenen Stellen der Supply Chain in ihrer Qualität geprüft. Bei der Qualitätskontrolle werden unterschiedliche Sensoren zur Qualitätsbewertung (Feuchtigkeit, Oberflächenqualität) sowie RFID-Identifikation gekoppelt und die so erhobenen Daten in einem Datenpaket zusammengeführt. Über den Service „Monitoring Manager“ (Erfassung und Kontrolle von Auftragszuständen) wird dieses Datenpaket abgerufen und mit auftragsbezogenen Daten angereichert. Somit ist ein echtzeitnaher Abgleich von Ist- und Soll-Qualitätsdaten möglich. Im Falle einer positiven Prüfung wird der Prozess gewohnt weitergeführt. Ein negatives Ergebnis wird entsprechend angezeigt und weist somit einen Handlungsbedarf aus. Dieser wird durch den „Scenario Manager“ in Form von priorisierten Handlungsalternativen ausgegeben. Zur weiteren Entscheidungsunterstützung berechnet der „Simulation Service“ auf Basis des aktuellen Auftragsstatus im Netzwerk und der gewählten Handlungsalternative die Auswirkungen auf die weiteren Prozesse in der Supply Chain. Ist die Erfüllung des Kundenwunschtermins aufgrund der kurzfristigen Ausschleusung des Auftrags aus dem Auftragspool nicht gewährleistet, können Maßnahmen (bspw. Priorisierung des Auftrags bei bestimmten Produktionsschritten) geplant werden, die wiederum durch weitere Simulationsläufe auf Wirksamkeit überprüft werden. Ist auch durch diese Vorgehensweise die termingerechte Erfüllung des Auftrags nicht gewährleistet, kann durch die Unterstützung des „Allocation Service“ ein Tausch mit einem alternativen Auftrag vorgenommen werden.

5 Zusammenfassung

Die in diesem Beitrag vorgestellte serviceorientierte Referenzarchitektur ermöglicht die Verknüpfung modularer Service-Bausteine der Supply Chain Planung und Steuerung zu einem logistischen Assistenzsystem. Die Services ermöglichen u.a. die Erhebung, Aufbereitung und Analyse von Daten zur Parametrisierung eines Simulationsmodells, die Simulation mit Hilfe eines Simulationsservices und die Analyse der erzeugten Ergebnisse. Durch die Entwicklungen ist es möglich, die Simulation als Entscheidungsunterstützung leichter für operative und taktische Entscheidungen nutzbar zu machen.

Die Funktionsfähigkeit der realisierten Referenzarchitektur wurde anhand der prototypischen Anwendungen im Rahmen der Projekte SCP und SCE erprobt. Die Simulation arbeitet dabei im Hintergrund und wird so Teil der taktischen oder operativen Planungsprozesse. Die prototypische Realisierung des hier beschriebenen Konzepts konnte zeigen, dass die Simulationstechnik mithilfe von Planungsservices

aufwandsarm in die bestehenden Geschäftsprozesse implementiert werden kann. Das Planungspersonal kann die Simulation in Form von einfach zu kalibrierenden Szenarien ohne spezielle Fachkenntnisse in der Modellierung und Simulation nutzen. Das Zusammenspiel der Planungsservices erlaubtes, alle Planungsschritte methodengestützt und in angemessener Zeit durchzuführen. In den untersuchten Anwendungsfällen trägt Sie zu einer besseren Qualität der Planungsergebnisse und einer stärkeren Vernetzung der Anwender bei.

Literatur

Baun, C.; Kunze, M.; Nimis, J. et. al: Cloud Computing, Web-basierte dynamische IT-Services. Berlin, Heidelberg; Germany; Springer-Verlag 2011.

EffizienzCluster Management GmbH: Logistics-as-a-Service - IT als Treiber für Innovation. Abgerufen unter : http://www.effizienzcluster.de/de/leitthemen_projekte/leitthema.php?lthPid=2 (30.05.2013).

Eley, M.: Simulation in der Logistik, Berlin, Springer Verlag 2012.

Erkayhan, S.: Ein Vorgehensmodell zur automatischen Kopplung von Services am Beispiel der Integration von Standardsoftwaresystemen. KIT, Karlsruhe, Hannover, Karlsruhe 2011.

Großmann, M.; Koschek, H.: Unternehmensportale. Grundlagen, Architekturen, Technologien. Berlin: Springer Verlag 2005.

Hegmanns, T.; Orlob, J.: Simulation-based IT-support for tactical distribution network planning. In: Spath, D.; Ilg, R.; Krause, T. (Hrsg.): 21th International Conference on Production Research (ICPR 21). Innovation in Product and Production. 31.07-04.08.11. Stuttgart; Germany; Fraunhofer Verlag 2011.

Hellingrath, B.; Kuhn, A.: Supply Chain Management – Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette. Heidelberg, New York, Berlin; Germany; Springer Verlag 2002.

Holtkamp, B.; Steinbuss, S.; Gsell H., Loeffeler, T.; Springer, U.: Towards a Logistics Cloud, Sixth International Conference on Semantics, Knowledge and Grids, Springer 2010.

Josuttis, N.: SOA in Practice. The Art of Distributed System Design. Sebastopol; USA; O'Reilly Media Inc 2007.

Klingebiel, K.; Toth, M.; Wagenitz, A.: Logistische Assistenzsysteme, in: Praxishandbuch Logistik, hrsg. von Pradel, U.- H. et al. Köln; Germany; Deutscher Wirtschaftsverlag 2010.

Kuhn, A.; Wagenitz, A.; Klingebiel, K.: Praxis Materialflusssimulation: Antworten, zu oft zu spät? In: Jahrbuch Logistik, S. 206 – 211, Korschenbroich; Germany; Free Beratung Gesellschaft für Kommunikation im Marketing mbH 2010.

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement, Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend; 6. Auflage, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer-Verlag 2011.

Seibold, W.: Ein Mehrprozessorsystem mit rekonfigurierbarer Verbindungsstruktur für die parallele und verteilte ereignisgesteuerte Simulation. Universität Stuttgart, Stuttgart 2002.

Steinbuß, S.; Hegmanns, T.; Yüzgülec, G. et al.: A construction kit of flexible services for supply chain planning and operations. In: Proceedings of 11th International Conference on Modeling and Applied Simulation. Vienna; Austria 2012.

Straßburger, S.; Schulze, T.; Fujimoto, R.: Future trends in distributed simulation and distributed virtual environments. Peer study final report, Version 1.0. Ilmenau, Magdeburg, Atlanta – January 17, 2008.

Timpe, K.-P.; Jürgensohn; T.: Perspektiven der Mensch-Maschine-Systemtechnik. In: Timpe, K.-P.; Jürgensohn, T.; Kolrep, H. (Hrsg): Mensch-Maschine-Systemtechnik. Symposion, Düsseldorf 2002.

Wagenitz, A.: Modellierungsmethode zur Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie; Dortmund Universität (Diss.) 2007.

Web Services Description Language (WSDL) 1.1. http://www.w3.org/TR/wsdl (31.07.2013).

Yüzgülec, G.; Klingebiel, K.; Groß, S.: Konzeption von IT-Bausteinen zur echtzeitnahen Steuerung von Supply Chains. In: Schenk, M.; Zadek, H.; Müller, G. et al. (Hrsg.): 17. Magdeburger Logistiktage, Sichere und nachhaltige Logistik. Magdeburg; Germany; Magdeburger Logistiktagung 2012.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Entwicklung eines integrierten Ansatzes für das Störungsmanagement in komplexen Transportnetzen unter Berücksichtigung variabler Störungsdauern

Integrated disruption management approach in complex transport networks considering variable duration of disruptions

Daniel Dreßler, Ulrike Beißert, Fraunhofer IML, Dortmund (Germany),
daniel.dressler@iml.fraunhofer.de, ulrike.beissert@iml.fraunhofer.de

Abstract: Increasing interdependencies in global production, supply and transport networks result in growing complex planning situations through increasing demands which is sensitive to disruptions. An integral planning and disruption management approach is necessary to ensure an efficient utilization of resources and to supply a stable plan in case of disruptions. In practice, measures against disruption are often implemented locally and ignore the effects on the global network. In this paper an integrated disruption management approach is proposed to reschedule a plan in case of a disruption and to evaluate measures regarding plan stability under variable disruption times.

1 Problemstellung

Die zunehmende weltweite Vernetzung in Produktions-, Versorgungs- und Transportketten sorgt mit dem ihr inhärenten Anstieg der Komplexität in den Netzwerkstrukturen und der stärkeren Verkettung der Prozessbeteiligten sowie ihrer Abhängigkeiten untereinander für erhöhte Anforderungen an die Planung der Transporte ebenso wie an das operative Management von Störungen. Mit dem Grad der Vernetzung der Wertschöpfungspartner steigt auch die Sensitivität innerhalb dieses Netzwerkes, d. h. die Empfindlichkeit gegenüber Störungen in den Prozessen. Gerade in Produktionsverbünden mit lokal verteilten Produktionskapazitäten bzw. Standorten ist daher eine ganzheitliche Transportplanung ebenso wie ein integriertes Störungsmanagement über alle Standorte zwingend erforderlich, um eine effiziente Ressourcenauslastung zu erreichen sowie im Störungsfall die aktuelle Netzwerkplanung stabil zu halten.

In der Praxis werden bei Eintritt von Störungen häufig basierend auf dem Erfahrungswissen der Mitarbeiter oder vorhandener Leitfäden Ad-hoc-Maßnahmen ergriffen, um Störungsdauern oder entstehende Kosten zu reduzieren. Insbesondere

in sensitiven Produktionsverbünden ist jedoch vielmehr der Einfluss der Maßnahmen im Hinblick auf die aktuell in Ausführung befindliche Planung zu betrachten. Um die Akzeptanz der Beteiligten in die Planung zu gewährleisten, sollte die gewählte Maßnahme bzw. Umplanung mit der größtmöglichen Planstabilität für die Prozessbeteiligten bezogen auf den Ursprungsplan einhergehen, d. h. einer geringen Anzahl an Anpassungen. Neben der Planstabilität sind verstärkt mögliche Änderungen der angenommenen Umgebungsbedingungen zu beachten z. B. Verlängerung der Störungsdauer. So ist die Berücksichtigung der Varianz der Störungsdauer im Rahmen des Störungsmanagements sinnvoll, um zu Umplanungen zu gelangen, die auch bei anhaltender Störungsdauer stabil reagieren. Die integrierte Bewertung der Handlungsalternativen im Störfall unter Berücksichtigung variabler Störungsdauer mit dem Ziel minimaler Anpassungen bei den Prozessbeteiligten wird aktuell nicht vorgenommen. Aufgrund der Vielzahl an gültigen Zuordnungen von Vorgängen auf Ressourcen in den verfügbaren Zeitfenstern ist die Untersuchung des Lösungsraums mittels Materialflusssimulation sinnvoll, um zeitnah gute und gültige Lösungen zu ermitteln.

In Kooperation mit der ThyssenKrupp Steel Europe AG wird ein Konzept für ein integriertes Transportleitsystem entwickelt, welches in einem Produktionsverbund übergreifend die Transportbedarfe auf unterschiedliche Verkehrsträger plant und die Wirkungen von Störungen und Gegenmaßnahmen transparent bewerten lässt. In dem vorliegenden Beitrag wird das Konzept zum Störungsmanagement des integrierten Transportleitsystems vorgestellt und exemplarisch anhand eines Ausschnitts des innerwerklichen Transportnetzwerkes in Plant Simulation demonstriert.

2 Ansätze zum Störungsmanagement und Plankriterien

Der hier vorgestellte Ansatz ist dem reaktiven Störungsmanagement zuzuordnen (u.a. Schwartz 2004; Fischer 2009). Dieser kann grob in drei Phasen unterteilt werden:

- Störungsidentifikation und -kommunikation,
- Analyse der Störung und Auswirkung auf die aktuelle Planung und
- Ermittlung und Bewertung einer Maßnahme und ihrer Plananpassung.

Die beiden erstgenannten Phasen stehen nicht im Fokus dieses Beitrags. Zur Vertiefung sei hier exemplarisch auf die Arbeiten von Fischer (2009) und Hinrichs (2009) verwiesen, die den Fokus ihrer Arbeit auf Störungsidentifikation und -kommunikation legen. Demgegenüber entwirft Fischäder (2007) ein Modell zur Bewertung der Auswirkungen von Störungen in Produktionssystemen und eine Methodik zur Planung von Anpassungs- und Abwehrmaßnahmen in den Systemen, welche eine Analyse von Störungen und deren Auswirkungen auf die bestehende Planung ermöglicht.

Der Fokus des vorliegenden Beitrags liegt auf der Ermittlung einer Maßnahme und ihrer Plananpassung (1) sowie der Bewertung (2). In den vergangenen Jahren wurden bereits vielfältige Ansätze und Methoden zur Plananpassung entwickelt. Beim *Total oder Complete Rescheduling* werden alle verbleibenden Aufträge beim Auftreten der Störung neu eingeplant (Yamamoto und Nofs 1985). Der Ursprungsplan wird dabei nicht berücksichtigt sondern bei jeder Störung entsteht

mit den verbleibenden Aufträgen ein neuer Plan. Im Gegensatz dazu werden beim *Right Shifting* verbleibende Aufträge um die Störddauer nach hinten verschoben (Yamamoto und Nofs 1985). Eine spezielle Erweiterung hierfür stellt das Projekt LogoTakt dar. In multimodalen Transportketten werden im Störfall im Rahmen der Umplanung zunächst vorhandene Pufferzeiten bei den Umschlagsvorgängen der einzelnen Verkehrsträger genutzt und der Auftrag verschoben, bevor alternative Transportressourcen eingesetzt werden, um das System zu entstören (Pulter et. al. 2010). Andere Verfahren wie der *Affected Operations Rescheduling* (AOR) Algorithmus von Abumaizar und Svestka (1997) behalten den Ursprungsplan bei und Planen nur Aufträge um, die direkt und indirekt von einer Störung betroffen sind. Die Methode des *Matchup* oder *Turnpike Scheduling* haben zudem das Ziel, ab einem bestimmten Zeitpunkt wieder auf den Ursprungsplan zurück zukommen (Bean und Birge 1991; Belz 1993). Der Vorteil liegt in dem geringeren Rechenaufwand sowie, dass die mögliche Abweichung zum Ursprungsplan von vornherein verringert wird. Bockholt (2012) entwirft ein umfassendes Referenzmodell um Störungen in globalen Lieferketten zu bewerten und gezielt Maßnahmen auszuwählen.

Neben einem geeigneten Algorithmus zur Umplanung sind auch geeignete Zielkriterien zur Bewertung der Umplanungen und damit einer Maßnahme sowie ihrer Plananpassung zu identifizieren. Zur Bewertung der Planung in einem Logistiksystem werden i. d. R. monetäre Zielgrößen wie Betriebs- und Leistungskosten und nicht monetäre Zielgrößen wie Leistungssteigerung und Qualitätssicherung herangezogen (Gudehus 2011; Rixen 1997). Mit Hinblick auf die anfangs gestellten Anforderungen an den Ansatz bleibt festzuhalten, dass sich diese Kriterien im Allgemeinen nicht zur Bewertung der Umplanung im integrierten Störungsmanagement eignen aufgrund ihrer mangelnden Aussagefähigkeit zur Sensitivität und Stabilität der Planungen z. B. ggü. variabler Störungsdauer. Eine Alternative bietet hier Scholl (2001), der sechs Kriterien definiert, um die Stabilität von Plänen hinsichtlich sich ändernden Umweltbedingungen bewertbar zu machen:

- Ergebnisrobustheit: Das Ergebnis eines Zielkriteriums verändert sich nicht.
- Optimalitätsrobustheit: Der Plan liefert immer das optimale Ergebnis bezogen auf einen Zielwert.
- Zulässigkeitsrobustheit: Der Plan ist unter den geforderten Restriktionen immer zulässig.
- Bewertungsrobustheit: Ein Plan ist unempfindlich gegenüber unscharfen Bewertungsansätzen und die Gesamtpräferenz für diesen Plan bleibt bestehen.
- Planungsrobustheit: In einem zeitlich dynamischen System bleibt der Plan für die folgenden Planungsperioden stabil.
- Informationsrobustheit: Auch bei sich ändernder Informationslage ist der Plan stabil.

Anhand des Stands der Forschung wird ersichtlich, dass bereits zahlreiche Vorgehensweisen und Methoden für das Störungsmanagement existieren. Für die vorliegende Zielstellung lassen sich die Ansätze jedoch nicht umfänglich anwenden, da Störungen als statisches Ereignis behandelt werden und die Dynamik der Störungsdauer bei der Auswahl von Maßnahmen keine Berücksichtigung findet. Obwohl einige Ansätze vor dem Hintergrund der Reduzierung des Rechenaufwands die Bestrebung zur Reduzierung des Planungsproblems haben, wird das Total Rescheduling als Umplanungsalgorithmus ausgewählt, damit ggf. potentielle

Lösungen vom Suchraum nicht ausgeschlossen werden. Um die Stabilität der Planung und die Sensitivität des Netzwerks zu berücksichtigen sowie den Einfluss einer variablen Störungsdauer zur Bewertung der Umplanung zu untersuchen, werden als Bewertungskriterien der Umplanung die Kriterien der Ergebnis- und Planungsrobustheit herangezogen.

3 Grundlegende Definition und Klassifikation von Störungen

Für den Ansatz des integrierten Störungsmanagement ist ein einheitliches Verständnis über die Abgrenzung des Begriffs der Störung, deren Klassifizierung und den zugehörigen Maßnahmen notwendig. Als Störung wird nach REFA ein Ereignis angesehen, welches

„unerwartet eintreten und eine Unterbrechung oder zumindest Verzögerung der Aufgabendurchführung zur Folge“

hat (REFA 1985, S.424). Dieser Definition folgend sind relevante Störungen für das betrachtete Transportnetz

- der Ausfall von Be- und Entladehilfsmittel,
- Ausfall bzw. der Mangel an Transportmitteln,
- fehlender Lagerplatz und Personal,
- beschädigtes Material oder abweichende Auftragsmengen,
- zusätzliche Eiltransporte bzw. externe Transportfahrzeuge.

In der Literatur finden sich verschiedene Klassifizierungsmöglichkeiten von Störungen z. B. in betriebsmittel- und personalbedingte Potentialfaktorstörungen, Repetier-, Informations- und Auftragsstörungen (Bormann 1978; Greve 1970), Primär- und Sekundärstörungen (Schwartz 2004). Vor den Herausforderungen eines integrierten Störungsmanagements wird mit *repulsive* und *remigrierende* Störung eine von bisherigen Ansätzen abweichende Klassifizierung von Störungen in Anlehnung an die Klassifikation der Störungsreaktion von Meyer (2007) und Heil (1995) gewählt. Nach Meyer und Heil beeinflussen repulsive Reaktionen die Störungswirkung aktiv und können ursachenbezogen sein, d. h. sie beheben Störungen direkt oder wirkungsbezogen und zielen auf die Verminderung der Störungswirkung/-folgen ab. Remigrierende Störungsreaktionen wirken passiv auf die Störung und können nur wirkungsbezogen sein. Bspw. erfordert die Störung eines nicht ersetzbaren Betriebsmittels eine remigierende Maßnahme, da bis zur Beendigung der Störung gewartet werden muss und daher nur unmittelbar die Störungswirkung abgemindert werden kann, z. B. durch planerische Maßnahmen wie die Umverteilung auf andere Ressourcen.

Die Klassifikation in repulsive und remigrierende Störungen ist entscheidend für die Bewertung der Umplanung, da eine remigrierende Störung mit großer Wahrscheinlichkeit mit höheren Abweichungen zum Ursprungsplan einhergeht, als eine Umplanung auf eine repulsive Störung. Dementsprechend müssen verschiedene Kriterien bei der Bestimmung der Stabilität des Plans berücksichtigt werden.

4 Konzeptioneller Aufbau des integrierten Störungsmanagements

Im Rahmen der Forschungsarbeit wird ein integriertes Transportleitsystem (TLS) in Zusammenarbeit mit ThyssenKrupp Steel Europe am Standort Duisburg entwickelt. Dieses umfasst Bestandteile zur Grobplanung, Detailplanung, Feinplanung und zum Störungsmanagement (siehe Abb.1). Nachfolgende Ausführungen sind lediglich auf die Vorstellung des Konzepts zum ganzheitlichen Störungsmanagement ausgerichtet.

Grobplanung	Detailplanung	Feinplanung	Störungsmanagement
• Verteilung des Ressourcenbedarfs (grob) im möglichen Transportzeitraum	• Buchung /Reservierung der Ressourcenbedarfe je Schicht • Berücksichtigung von bekannten, geplanten Einflussfaktoren (Bekannte Stillstände, Ausfälle)	• Reihenfolgeplanung der Ressourcen auf Basis von verifizierten Kapazitäten • Berücksichtigung von extern gebuchten Zeitfenstern	• Prüfung der Auswirkung einer Störung auf die bestehende Feinplanung • Ermittlung, Bewertung und Auswahl alternativer Maßnahmen

Abbildung 1: *Komponenten des integrierten TLS und Aufgabenspezifikation*

Der Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes für das Störungsmanagement liegt die Annahme zugrunde, dass bei variierender Störungsdauer und Ausmaß der Wirkungen einer Störung auch unterschiedliche Gegenmaßnahmen geeignet sind und mit andersartigen Änderungen an der bestehenden Planung einhergehen. Im Rahmen der Untersuchungen im Störungsmanagement sollte daher auf den Parameter Störungsdauer besonderer Fokus gelegt werden.

4.1 Aufbau

Das Störungsmanagement unterteilt sich in drei sukzessiv aufeinander aufbauende Komponenten der Analyse, Planung und Bewertung. Die Komponenten sollen im Nachfolgenden detailliert beschrieben werden.

Analyse

Die Analyse dient zur Identifikation der Gegenmaßnahmen sowie untersuchungswürdiger Störungsdauern, d. h. relevanter Störfallszenarien. Hierzu ist eine geeignete Datenbasis vorzuhalten, bestehend aus historischen Daten und einem Katalog mit Gegenmaßnahmen zu den Störereignissen.

- Die historische Datenbasis dient der zielgerichteten Bewertung der Störung mit Fokus auf ihrer Dauer. Hierin können Informationen über die vergangenen Störereignisse sowie ihrer Umweltbedingungen abgelegt werden wie Ort und Art der Störung bzw. betroffene Ressource und ebenso die Störungsdauer. Die Auswertung der historischen Daten ermöglicht die Spezifikation untersuchungswürdiger Störfallszenarien. Im einfachsten Fall können diesen Szenarien aus den Min-, Max- und Durchschnittsdauern der vergangenen Störungen abgeleitet werden. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Faktoren wie Ort der Störung oder durch die Verwendung von Prognoseverfahren über die Zeitdauern lässt sich der Grad der Genauigkeit der Untersuchung steigern.

- Neben den historischen Daten umfasst die Datenbasis einen Maßnahmenkatalog, in welchem zu den möglichen Störungen jeweils unterschiedliche Maßnahmen, d. h. Prozesse zu ihrer Auflösung enthalten sind.

Planung

Die Planungskomponente ermöglicht die Untersuchung einer Vielzahl an gültigen Umplanungen (UP) basierend auf dem erzeugten Experimentplan.

In Abhängigkeit der Art, dem Auftrittsort und dem Zeitpunkt an dem die Störung auftritt, ist eine unterschiedliche Anzahl aus der Menge von Transportaufträgen A = $\{A_1,\ldots, A_n\}$ von der Störung betroffen. Jeder Auftrag A_i ist definiert u. a. durch einen Start- (ST) und Endtermin (ET), einer Auftragsmenge (M) sowie einer zur Ausführung benötigten Ressource (R). Diese müssen auf die aktuell und zukünftig verfügbaren Ressourcen in der Art umgeplant werden, dass die auftragsspezifischen Restriktionen wie Anliefertermine bestmöglich erfüllt sind. Da im Rahmen der Umplanung eine isolierte Betrachtung der direkt oder indirekt betroffenen Aufträge im Hinblick auf die fristgerechte Auftragserfüllung ein geringeres Potential als eine komplette Neuplanung ermöglicht, soll hier der Ansatz des Complete Rescheduling von Yamamoto und Nofs (1985) Anwendung finden. Bei der Problemstellung handelt es sich um ein NP-vollständiges Problem mit einem kombinatorisch großen Lösungsraum. Die Generierung aller möglichen Umplanungen in endlicher Zeit ist nicht möglich (Sauer 2004). Im Störungsfall ist zudem die schnelle Ermittlung einer guten Lösung hinreichend, so dass im vorliegendem Konzept für jede Maßnahme des Experimentplans unter Annahme der repräsentativen Störungsdauer mit Hilfe der Monte Carlo Simulation eine Menge an gültigen Lösungen ermittelt werden soll.

Bewertung

Die Bewertungskomponente ermöglicht die Bewertung der Lösungen hinsichtlich der Kriterien Planungs- und Ergebnisrobustheit bei variabler Störungsdauer, welche in Anlehnung an Scholl (2001) definiert wurden. Zur Ermittlung der Planungsrobustheit sollen alle Umplanungen k (UP_k) dem Originalplan (OP) gegenübergestellt und die Anzahl der Abweichungen hinsichtlich Ressourcen (ABW_R) und Terminen (ABW_T) sowie der Dauer der Verschiebungen (ABW_D) untersucht werden mit:

$$ABW_{R,k} = \sum_{i=1}^{n} X_{A_i} \; mit \begin{cases} X_{A_i} = 1 & , \; wenn \; A_i(R_{UP_K}) \neq A_i(R_{OP}) \\ X_{A_i} = 0 & , sonst \end{cases} \tag{1}$$

$$ABW_{T,k} = \sum_{i=1}^{n} Y_{A_i} \; mit \begin{cases} Y_{A_i} = 1 & , wenn \; A_i(ET_{UP_K}) \neq A_i(ET_{OP}) \\ Y_{A_i} = 0 & , sonst \end{cases} \tag{2}$$

$$ABW_{D,k} = \sum_{i=1}^{n} t_{A_i}, mit \begin{cases} t_{A_i} = \Delta ET, wenn\ A_i(ET_{UP_k}) \neq A_i(ET_{OP}) \\ t_{A_i} = 0 \qquad\qquad , sonst \end{cases} \quad (3)$$

$$mit\ \Delta ET = \left| ETU_{UP_k} - ET_{OP} \right|$$

Die Ergebnisrobustheit bei variabler Stördauer soll mittels der Leistungskennzahl Auftragserfüllung (ERF_A) bewertet werden. Zur Ermittlung der Kennzahl wird die Teilmenge an geplanten Aufträgen (A) herangezogen, die zum Beginn der Störung noch nicht beendet ist. Der Grad der möglichen Auftragserfüllung bei repräsentativer Stördauer wird berechnet und stellt in der weiteren Betrachtung die maximal mögliche Ergebnisrobustheit (1,0) dar. Zur weiteren Untersuchung werden die definierten Störfallszenarien betrachtet und ihre relative Ergebnisrobustheit im Bezug zum Szenario mit repräsentativer Stördauer ermittelt. Bei mehreren Störfallszenarien wird der Mittelwert über die ERF_A gebildet.

4.2 Zusammenspiel der Komponenten

Abbildung 2 liefert einen Überblick über das Zusammenspiel der Komponenten des integrierten Störungsmanagements. Basierend auf den historischen Daten zu vergangenen Störereignissen und einem Maßnahmenkatalog wird zunächst ein Experiment bzw. Untersuchungsplan erzeugt, der die relevanten zu untersuchenden Gegenmaßnahmen, die repräsentative Störungsdauer sowie weitere Störfallszenarien beinhaltet. Dieser Experimentplan und der bestehende aktuelle Transportplan bilden die Grundlage zur simulationsgestützten Generierung gültiger Umplanungen mittels der Planungskomponente. Als Ergebnis der Planungskomponente wird für jede Maßnahme des Experimentplans eine Menge an gültigen Umplanungen ermittelt. Im nächsten Schritt gilt es diese Lösungsmengen im Hinblick auf ihre Planungssicherheit sowie Ergebnisrobustheit bei variabler Störungsdauer zu bewerten. Hierbei finden die definierten Störfallszenarien des Experimentplans Berücksichtigung. Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen und der Zielpräferenz der Planer kann anschließend die Entscheidung für eine geeignete Umplanung zum neuen gültigen Transportplan erfolgen.

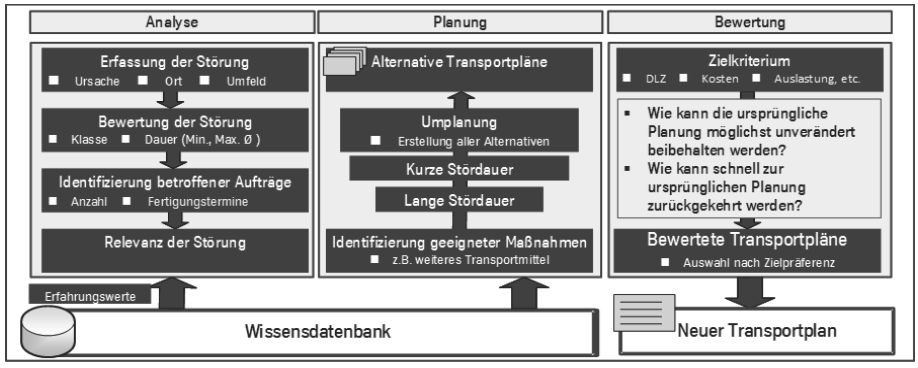


Abbildung 2: *Komponenten des integrierten Störungsmanagements*

5 Fallbeispiel

Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein Transportnetzwerk bestehend aus drei Standorten mit je einem Stellplatz für die Be- oder Entladung sowie drei Transportfahrzeugen angenommen. In dem Betrachtungszeitraum von 8 Stunden sollen in 15 Aufträgen insgesamt 100 Materialstücke in diesem Netz transportiert werden. Eine Reihenfolge der Transportaufträge (Originalplan) wurde mit Hilfe von Simulation ermittelt. Darin konnten die Aufträge innerhalb der Schicht vollständig abgearbeitet werden.

Im Störfallszenario liegt direkt zu Schichtbeginn eine Störung an einem der Transportfahrzeuge vor. Durch die *Analyse* sollen realistische Störungsdauern ermittelt werden. Im Fallbeispiel seien als repräsentative Störungsdauer 60 Minuten angenommen, d. h. das Fahrzeug ist nach dieser Zeit wieder einsatzbereit. Zwei weitere Störfallszenarien seien hier mit Störungsdauern von 90 (SD1) und 120 Minuten (SD2) gegeben. Folgende Maßnahmen wurden identifiziert und sollen im Experimentplan als mögliche Gegenmaßnahme untersucht werden:

- *Maßnahme 1*: Neuplanung ohne Restriktionen, d. h. Neuplanung aller Aufträge auf allen verfügbaren Transportressourcen
- *Maßnahme 2*: Neuplanung mit Ressourcenbindung, d. h. Neuplanung aller Aufträge unter Beibehaltung der Zuordnung der Transportressourcen

Für jede Maßnahme wurden 1000 Simulationsläufe durchgeführt und die Pläne hinsichtlich der Kriterien Planungsrobustheit und Ergebnisrobustheit bewertet.

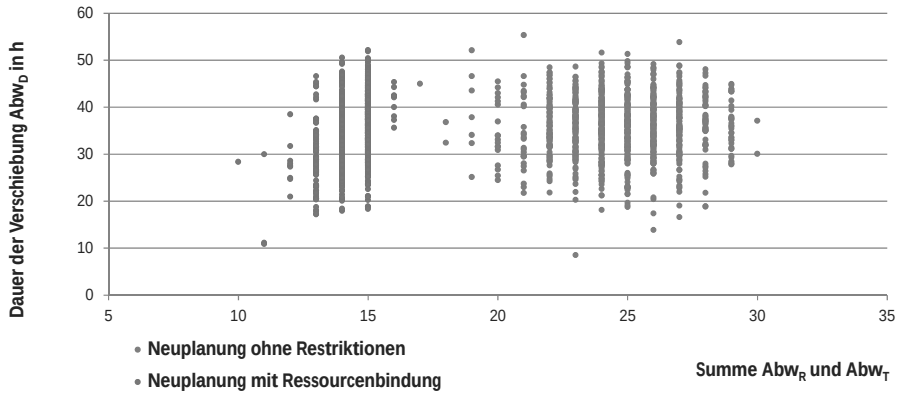


Abbildung 3: *Anzahl Gesamtänderungen und Dauer der Verschiebung*

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Planungsrobustheit durch Summe der Anzahl an Termin- und Ressourcenabweichung sowie die Dauer der Terminverschiebung je Simulationslauf angegeben. Bei Betrachtung der Anzahl an Änderungen zum Originalplan liefert Maßnahme 2 die besseren Ergebnisse und im Hinblick auf die Terminverschiebung das Experiment mit Maßnahme 1. Da im Experiment mit Maßnahme 2 deutlich weniger Änderungen zugelassen wurden, sind gute Ergebnisse zu erwarten gewesen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei geänderter Priorisierung der Zielkriterien andere Maßnahmen gute und sogar bessere

Ergebnisse erzielen lassen. Eine intensive Untersuchung aller Maßnahmen ist daher aus planerischer Sicht sinnvoll, um eine objektive Bewertung zu erhalten.

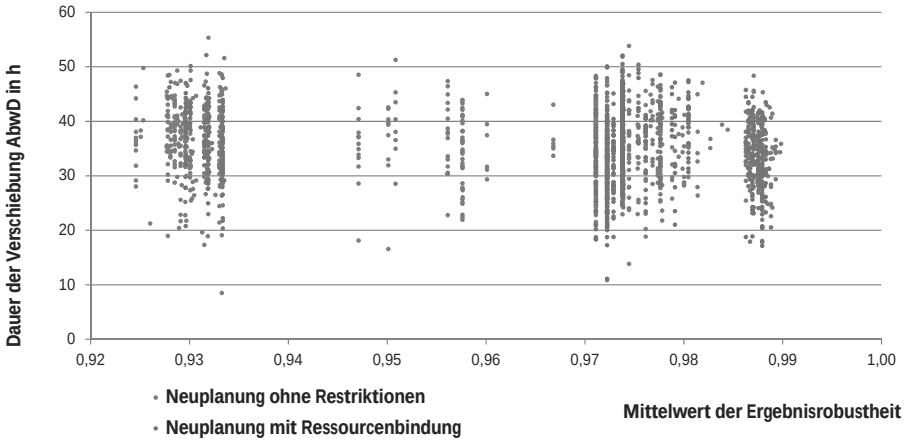


Abbildung 4: *Ergebnis- und Planungsrobustheit der Maßnahmen 1 und 2*

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Ergebnisse beider Maßnahmen hinsichtlich ihrer Planungsrobustheit und Ergebnisrobustheit in den Störfallszenarien SD1 und SD2. Die Ergebnisrobustheit liegt bei Maßnahme 1 zwischen 0,9246 und 0,9898, bei Maßnahme 2 zwischen 0,9278 und 0,9888. D.h. die Leistungserfüllung bei anhaltender Stördauer unterscheidet sich zwischen den einzelnen Planungen um bis zu 7%. Maßnahme 1 geht mit einer höheren Streuung der Ergebnisse einher. Keine der beiden Maßnahmen ist im Hinblick auf die Ergebnisrobustheit als eindeutig besser einzustufen. Das Fallbeispiel zeigt, dass eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Umplanung existiert. Im Rahmen des Störungsmanagements sollte auf dem Erfahrungswissen der Planer aufgebaut werden, um eine Auswahl bevorzugter Maßnahmen zu identifizieren. Darüber hinaus sollten jedoch auch intuitiv nicht favorisierte Maßnahmen im Rahmen der Untersuchung Berücksichtigung finden, da sich gezeigt hat, dass in Abhängigkeit der Priorisierung der Zielkriterien solche Maßnahmen sehr gute Ergebnisse liefern können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Konzept zum Störungsmanagement für Transportnetzwerke vorgestellt, das die Berücksichtigung variabler Störungsdauern ermöglicht. An einem Fallbeispiel wurde veranschaulicht, dass mit Hilfe des Ansatzes Planer befähigt werden, gezielt die Auswirkung von Maßnahmen zu betrachten und aufbauend hierauf transparent und objektiv Entscheidungen zu treffen. Für die zukünftige Arbeit muss das Simulationsmodell um zusätzliche Restriktionen erweitert werden z. B. Zeitfenster für Transporte. Ebenso sollten neben repulsiven Störungen auch remigrierende in dem Konzept Berücksichtigung finden. Remigrierende Störungen gehen zwingend mit einer Vielzahl an Planänderungen einher. Hier steht vielmehr die Suche nach einem geeigneten

Netzzustand im Vordergrund, der eine schnelle Rückkehr zur ursprünglichen Planung ermöglicht.

Literatur

Abumaizar, R. J.; Svestka, J. A.: Rescheduling job shops under random disruptions. International Journal of Production Research 35 (1997) 7, S. 2065–2082.

Bean, J. C.; Birge, J. R.; Mittenthal, J.; Noon, C. E.: Matchup Scheduling with Multiple Resources, Release Dates and Disruptions. Operations Research 39 (1991) 3, S. 470–483.

Belz, R.: Entscheidungsunterstützung auf Leitstandebene durch wissensbasierte Simulation. Dissertation. Univ. Erlangen (1993).

Bockholt, F.: Operatives Störungsmanagement für globale Logistiknetzwerke. Ökonomie- und ökologieorientiertes Referenzmodell für den Einsatz in der Automobilindustrie. Dissertation. Dortmund: Praxiswissen (2012).

Bormann, D.: Störungen von Fertigungsprozessen und die Abwehr von Störungen bei Ausfällen von Arbeitskräften durch Vorhaltung von Reservepersonal. Berlin: Marchal und Matzenbacher (1978).

Fischäder, H.: Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (2007).

Fischer, S.: Entwicklung eines Referenzmodells zur Entscheidungsunterstützung im reaktiven Störungsmanagement in KMU. Dissertation. TU Dortmund: Praxiswissen (2009).

Greve, J.: Störungen im Industriebetrieb. Dissertation. Techn. Hochsch., Darmstadt, Darmstadt (1970).

Gudehus, T.: Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (2011).

Heil, M.: Entstörung betrieblicher Abläufe. Techn. Univ., Wiesbaden, München: Dt. Univ. Verl. (1995).

Hinrichs, J. A.: Unterstützung des dispositiven Störungsmanagements. Dissertation. TU Dortmund: Praxiswissen (2009).

Meyer, C. M.: Integration des Komplexitätsmanagements in den strategischen Führungsprozess der Logistik. Techn. Univ., Institut für Logistik und Unternehmensführung, Bern, Stuttgart, Wien: Haupt (2007).

Pulter, N.; Nimis, J.; Lockemann, P. C. (2010): Störungsmanagement in offenen, getakteten Logistiknetzen. In: Künstliche Intelligenz 24 (2010) 2, S. 131–136.

REFA Bundesverband e.V.: Methodenlehre der Planung und Steuerung. 4. Aufl.: München: Hanser (1985).

Rixen, I.: Maschinenbelegungsplanung mit evolutionären Algorithmen. Wiesbaden: DUV, Dt. Univ.-Verl. (1997).

Scholl, A.: Robuste Planung und Optimierung. Heidelberg: Physica (2001).

Schwartz, F.: Störungsmanagement in Produktionssystemen. Aachen: Shaker (2004).

Yamamoto, M.; Nof, S. Y.: Scheduling/rescheduling in the manufacturing operating system environment. In: International Journal of Production Research 23 (1985) 4, S. 705–722.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Effizienzsteigerung für Routenzüge – Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität

Efficiency in in-plant milk-run systems – the influence of routing strategies on system utilization and process stability

Tobias Staab, Stefan Galka, Eva Klenk, Willibald A. Günthner, TU München, Garching (Germany), staab@fml.mw.tum.de, galka@fml.mw.tum.de, klenk@fml.mw.tum.de, guenthner@fml.mw.tum.de

Abstract: Planning in-plant milk-run systems is a complex task because these systems are dynamic and a high number of different dependencies, e.g. blockages, occur. Using a discrete event simulation model, these dependencies can be modelled and analyzed accurately. We present a generic model to simulate different milk-run systems focusing on the physical handling steps. The resulting traffic situation and service level are measured and used to identify critical situations. We applied the model to a large planning project from industrial practice and were able to derive recommendations to improve system performance.

1 Routenzüge zur Produktionsversorgung

In der Automobilindustrie lässt sich der zunehmende Einsatz von Routenzügen für den innerbetrieblichen Materialtransport beobachten (Günthner et al. 2012). Zahlreiche Unternehmen arbeiten derzeit an der Neu-Einführung, Überplanung oder Standardisierung ihrer Routenzugsysteme, denn diese gelten als effizient, sicher und stabil, insbesondere wenn Materialien in hoher Frequenz und kleinen Losgrößen Just-in-time bereitgestellt werden müssen.

Bei derartigen Routenzugsystemen handelt es sich um komplexe und dynamische Systeme. Auf mehreren, meist festgelegten Routen müssen von mehreren Routenzügen in kurzen Zyklen diverse Ladungsträger an verschiedene Verbauorte verteilt werden. I.d.R. schwanken die Transportbedarfe und sind erst recht kurzfristig exakt bekannt, dennoch muss eine sichere, stabile und gleichzeitig effiziente Versorgung gewährleistet werden. Die verschiedenen Routenzüge nutzen Ressourcen wie z.B. Beladebahnhöfe und Wege gemeinsam, wodurch zusätzlich Abhängigkeiten zwischen den Routen sowie gegenseitige Behinderungen und Behinderungen mit anderen Fahrzeugen auftreten können, mit Staus und Verspätungen der Züge als Folge. Die Verkehrssituation hat damit entscheidenden

Einfluss auf die Stabilität im System und die Versorgungssicherheit, d.h. die rechtzeitige Bereitstellung der Materialien durch das Routenzugsystem. Hierauf kann wiederum über die Routenführung, die Reihenfolge, in der Routen gestartet werden, oder den Einsatz von Sonderfahrten für besonders zeitkritische Materialien Einfluss genommen werden. Aufgrund dieser Abhängigkeiten sowie der Dynamik und Unsicherheit der Bedarfe kann das Systemverhalten in der Planungsphase mit statischen Betrachtungen nur unzureichend abgeschätzt werden. Die ereignisdiskrete Simulation ist hierfür besser geeignet, da sich sowohl Behinderungen zwischen Objekten, also auch die Stochastik im System detailliert abbilden lassen und Rückschlüsse auf die Versorgungssicherheit und Auslastung der Routenzüge gezogen werden können. Im vorliegenden Beitrag werden anhand eines Praxisbeispiels durchgeführte Experimente zur Untersuchen des Einflusses der Routenführung, der Routenreihenfolge, der sonstigen Fahrzeuge etc. auf die Verkehrssituation und damit auf die Versorgungssicherheit vorgestellt. Der Fokus der Betrachtungen liegt auf der Nachbildung der Prozesse auf dem Shop Floor (Beladung, Bereitstellung, Fahren, Überholen, etc.), da diese die Verkehrssituation maßgeblich beeinflussen.

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

In einigen Unternehmen, insbesondere wenn größere Routenzugsysteme umgesetzt werden sollen, wird zur Absicherung der Planung die Ablaufsimulation eingesetzt (Günthner et al. 2012). Entsprechende Modelle sind i.d.R. projektspezifisch und bilden den jeweils geplanten Prozess und das jeweilige Wegenetz ab, sind jedoch nicht ohne weiteres auf verwandte Fragestellungen übertragbar.

Ein generischer Ansatz wird hingegen im VDA Automotive Bausteinkasten (Mayer und Pöge 2010) für die Ablaufsimulation in Plant Simulation verfolgt. Dieser bietet zahlreiche Bausteine zur Abbildung der Prozesse in Automobilfabriken in großem Umfang an, unter anderem kann auch ein Routenzug als Fahrzeug eingesetzt werden. Blockierungen können zwar abgebildet werden, jedoch können für Routenzüge ohne zusätzliche Erweiterungen durch den Nutzer keine festen Routen vorgegeben werden. Zudem ist dieser Bausteinkasten nicht öffentlich zugänglich.

In Digitaler-Fabrik-Software wie bspw. MALAGA (Roth 2013) können feste Routen für Routenzüge basierend auf einem Knoten-Kanten-Modell und einem CAD-Layout festgelegt und hinsichtlich des minimalen Weges optimiert werden. Im Modell sind jedoch keine Behinderungen zwischen Routenzügen abbildbar, der Schwerpunkt liegt auf der Planung und 3D-Visualisierung. Außerdem wird mit mittleren Bedarfen, Fahrzeiten etc. gerechnet und Schwankungen im Betrieb nicht berücksichtigt.

Die Verkehrssituation mit Behinderungen steht hingegen im Mittelpunkt bei Softwarepaketen zur Straßenverkehrssimulation wie bspw. SUMO (Krejzewicz und Behrisch 2013). Hier sind andererseits keine logistischen Objekte, wie bspw. Behälter, Routenzüge usw. mit ihren spezifischen Eigenschaften vorgesehen. Diese müssten durch Omnibusse, Fußgänger etc. nachgebildet werden, welche im Detail ein anderes Verhalten zeigen.

3 Aufbau Simulationsmodell

Auf Grund des komplexen und dynamischen Charakters der vorliegenden Problemstellung bietet sich eine Simulationsstudie an, um zu hinreichend genauen Aussagen zu gelangen (Schenk et al. 2008). Das ereignisdiskrete Simulationsmodell, das den Experimenten in dieser Arbeit zu Grunde liegt, erlaubt es, Routenzugsysteme bereits in der Planungsphase abzubilden. Der Fokus liegt dabei auf den physischen Teilprozessen, die in einem solchen System ablaufen, beispielsweise Fahrten, Beladung und Bereitstellung. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich drei Anforderungen, die bei der Modellierung und Implementierung beachtet werden müssen. Durch einen einfachen und adaptiven Aufbau können verschiedene Systeme und verschiedene Varianten der Routenplanung schnell modelliert und miteinander verglichen werden. Weiterhin sollen alle wichtigen Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugen abgebildet werden, um problematische Verkehrssituationen identifizieren und analysieren zu können. Zuletzt muss die Simulation dem Planer ermöglichen, Materialbedarfe so abzubilden, dass auch Schwankungen und Bedarfsspitzen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Routenzugsystem untersucht werden können.

Die Modellierung beruht auf der Analyse bestehender Routenzugsysteme, wie sie in Unternehmen zur Anwendung kommen. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Steuerungsprinzipien und Be- und Entladeprozessen (Günthner et al. 2012) wurde eine Unterteilung der Systemelemente in zwei Gruppen vorgenommen. Die erste Gruppe umfasst solche Bestandteile eines Routenzugsystems, die zur Abbildung des Wegenetzes und der Routenzüge benötigt werden und in vielen Anwendungsfällen in ähnlicher oder gleicher Weise vorkommen, beispielsweise Wege, Kreuzungen, Haltestellen und Routenzüge. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die gewählten Beladeprozesse und Bedarfssteuerungen oft stark, abhängig von den Randbedingungen des jeweiligen Anwendungsfalls. Diese systemspezifischen Module können über schlanke, definierte Schnittstellen mit dem Wegenetz kombiniert werden. Die modulare Struktur gewährleistet, dass verschiedene Systemausprägungen und Varianten der Routenplanung schnell modelliert werden können.

Durch die vorgegebenen Fahrtrouten, häufig in Kombination mit einem festen Fahrplan, verfügt ein Routenzugsystem nicht über den benötigten Flexibilitätsgrad, um auf kritische Verkehrssituationen passend zu reagieren. Der Fokus des vorliegenden Simulationsmodells liegt daher auf den physischen Teilprozessen, welche derartige kritische Verkehrssituation verursachen und die die Stabilität der Materialversorgung potenziell gefährden, wie der Bereitstellung von Material oder dem Abbiegen an Kreuzungen.

Kreuzungen verfügen über einen Steuerungsmechanismus, der Vorfahrt und gleichzeitiges Abbiegen regelt. Dabei gilt, dass maximal zwei Routenzüge zugleich eine Kreuzung durchfahren können. Zusätzlich ermittelt eine Kollisionsabfrage, ob die Abbiegewünsche der beiden Züge kompatibel sind. Falls nicht, durchfahren die Züge in der Reihenfolge ihrer Ankunft die Kreuzung nacheinander. Die Bedeutung dieser Steuerung wird vor allem in Wegenetzen mit kurzen Distanzen zwischen Bereitstellorten und Kreuzungen deutlich. In diesen Fällen treten häufig während der Bereitstellung Stauungen auf, die sich in die Kreuzung erstrecken. So können bei ungünstiger Routenführung nachfolgende Züge die Kreuzung nicht durchfahren und

müssen ebenfalls warten, während bei günstiger Routenführung nachfolgende Züge nicht betroffen sind.

Die Bereitstellung stellt den Teilprozess mit dem größten Zeitverbrauch dar und birgt großes Potenzial für Stauungen oder Blockaden, da der Zug solange auf dem Weg steht und diesen blockiert. Ein Vergleich der Laufwege des Fahrers zwischen Anhänger und Bereitstellregal zeigt, dass die zurückzulegende Distanz je Ladeeinheit im ungünstigsten Fall bis auf das Doppelte ansteigen kann, wenn der Routenzug umrundet und der Weg überquert werden muss.

Der Überholvorgang birgt besondere Komplexität, da er durch eine Vielzahl an Faktoren fehlschlagen kann. In einem solchen Fall würden im realen System die Fahrer kommunizieren und versuchen, die Situation beispielsweise durch Anpassung der Geschwindigkeit oder kurzes Anhalten zu lösen. Diese Möglichkeit des verteilten Problemlösens besteht jedoch in der diskreten Ereignissimulation nicht. Der Überholvorgang wurde daher so gestaltet, dass vor Beginn die momentane Verkehrssituation im betroffenen Bereich des Wegenetzes analysiert und über die Dauer des Überholens extrapoliert wird. Bei garantiertem Erfolg wird der Überholvorgang gestartet.

Zusätzlich können Hindernisse wie Ladungsträger auf den Wegen oder weitere Fahrzeuge, die den Fertigungsbereich durchfahren, als Störungen modelliert werden. Auch die Gestaltung der Beladebahnhöfe birgt Potenzial für gegenseitige Behinderung, beispielsweise wenn verspätete Routenzüge den Bahnhof für nachfolgende Züge blockieren oder Routenzüge in der falschen Reihenfolge im Bereitstellbereich ankommen. In diesem Fall müssen geeignete Gegenmaßnahmen, beispielsweise ein Ersatzzug oder Parkplätze eingeplant werden.

Zur Unterstützung der Planung muss das Simulationsmodell in der Lage sein, aussagekräftige Kennzahlen zu generieren. Um die Fahrplaneinhaltung und Stabilität der Versorgung beurteilen zu können, werden fahrzeugbezogen folgende Kennzahlen ermittelt:

- Der Servicegrad ist definiert als das Verhältnis der Ladeeinheiten, die innerhalb einer vorgegebenen Zeit am Zielort bereitgestellt wurden, und der Gesamtzahl beförderter Ladeeinheiten einer Tour.
- Die Kapazitätsauslastung gibt den durch Ladeeinheiten belegten Anteil an der Gesamtkapazität des Routenzugs je Tour an.
- Die Zykluszeit ist definiert als Zeitspanne zwischen Abfahrt und Ankunft in der Beladezone. Sie setzt sich zusammen aus der konstanten Fahrzeit sowie den variablen Bereitstell- und Wartezeiten.
- Basierend darauf wird die zeitliche Auslastung als Verhältnis von Zykluszeit und Taktzeit berechnet. Hierbei gibt die Taktzeit die geplante Zeitspanne zwischen zwei Abfahrtszeitpunkten in der Beladezone an.
- Um die Routenführung beurteilen zu können, werden für jeden Routenzug die Zeiten bestimmter Aktivitäten wie Fahren, Warten und Bereitstellung protokolliert.

Zur Beurteilung der Routenführung und Identifikation möglicher kritischer Stellen im Verkehrsnetz werden layoutbezogen für jedes Wegstück die Anzahl an wartenden Fahrzeugen und an Überholvorgängen während des gesamten Simulationslaufs ermittelt. Werden fahrzeug- und layoutbezogene Kennzahlen zusammengeführt, gelingt es, Handlungsempfehlungen abzuleiten, die sowohl

Fahrplan und Stabilität des Prozesses als auch die Routenführung berücksichtigen und verbessern lassen.

4 Anwendungsbeispiel

Das entwickelte generische Simulationsmodell wurde im Rahmen eines Industrieprojektes eingesetzt. Im Zuge dieses Projektes wurde ein neues Logistikkonzept (NLK) für ein Produktionswerk eines Automobilzulieferers entwickelt. Basis des NLK ist der flächendeckende Einsatz von Routenzügen für alle Materialtransporte im Werk. Dies umfasst sowohl die Materialbereitstellung in der Produktion, den Transport von Baugruppen innerhalb der Produktion als auch den Abtransport von Fertigwaren in den Versandbereich. Im Zuge dieser Umstellung wurden ein neues Lager für Fertigware und zwei Automatiklager für Kaufteile – ein Paletten-Hochregallager (HRL) und ein Automatisches Kleinteilelager (AKL) – gebaut. In Abbildung 1 ist das Werk mit den drei neuen Lagerbereichen zu sehen.

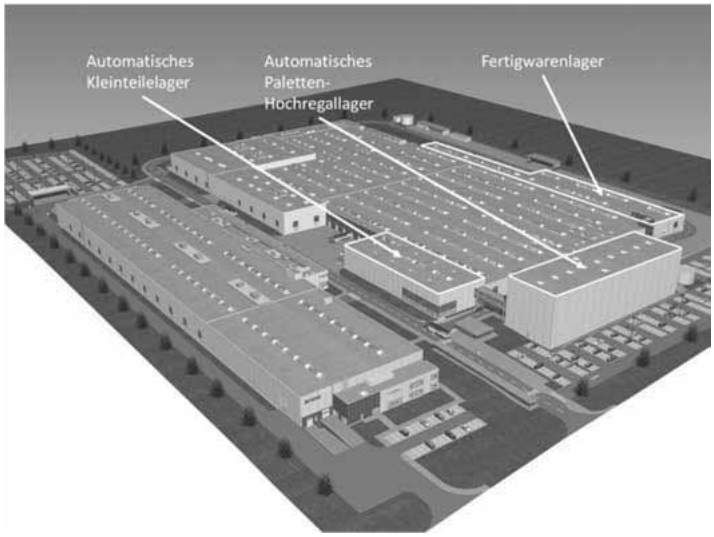


Abbildung 1: *Werksansicht mit den drei neuen Lagerbereichen*

Die für den Transport von Baugruppen und Fertigwaren eingesetzten Routenzüge fahren permanent auf festgelegten Routen und werden nicht durch ein IT-System gesteuert. Die Versorgung der Produktion mit Kaufmaterialien in Großladungsträgern (GLT) und Kleinladungsträgern (KLT) erfolgt mit unterschiedlichen Routenzügen, die unabhängig voneinander operieren. Aufgrund der vorgelagerten Prozessschritte für die Materialbereitstellung aus den Automatiklagern ist eine Steuerung der Routenzüge für die Produktionsversorgung notwendig. Die Herausforderung dabei ist es, die Prozesse an den sogenannten Beladebahnhöfen so aufeinander abzustimmen, dass sowohl die Fördertechnik kontinuierlich arbeiten kann als auch die Routenzüge sich nicht gegenseitig behindern, da sie auf gleiche Ressourcen (Flächen, Beladetechnik) zugreifen müssen. Die Steuerung muss somit die Abläufe der Routenzüge und der Technik

synchronisieren. Dies ist nur dann handhabbar, wenn die Routenzüge zu festgelegten Zeitpunkten beladen werden und ihre Ausliefertour starten. Aus diesem Grund operieren die Züge nach einem festen Fahrplan in immer gleichen Takten auf fixen Routen. Alle GLT-Routen fahren in einem 20 Minuten-Takt und die KLT-Routen in einem 45 minütigen Takt. Die Abfahrtszeiten an den Materialquellen werden gestaffelt, so dass nicht alle Züge zur gleichen Zeit am Bahnhof starten. Damit kann die Belastung der automatischen Lager nivelliert werden. Um die gestaffelte Abfahrt der Routenzüge sicherzustellen, ist es essenziell, dass der Routenzug innerhalb der geplanten Zykluszeit seine Tour abschließt, damit er die nächste Tour pünktlich am Bahnhof starten kann. Dies ist aber nur möglich, wenn er störungsfrei das Material ausliefern kann. Bei der Planung der Routen und Fahrpläne ist es nur schwer möglich, die Wechselwirkungen zwischen den Routenzügen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund soll mit Hilfe des Simulationsmodells die Planung der Routen und des Fahrplans abgesichert werden. Da im Betrieb trotzdem mit Verzögerungen zu rechnen ist, sind Notfallprozesse für den Fall definiert, dass ein Routenzug nicht pünktlich zum Start der nächsten Tour am Bahnhof ist. In diesem Fall alarmiert das Leitsystem den Leitstand und ein Ersatzzug übernimmt die Tour. Somit kann die Materialversorgung sichergestellt werden. Die strikte Einhaltung des Versorgungstaktes ermöglicht eine starke Reduzierung der Sicherheitsbestände in der Produktion und gibt den Produktionsmitarbeitern die Sicherheit, dass sie sich auf die Materialversorgung verlassen können.

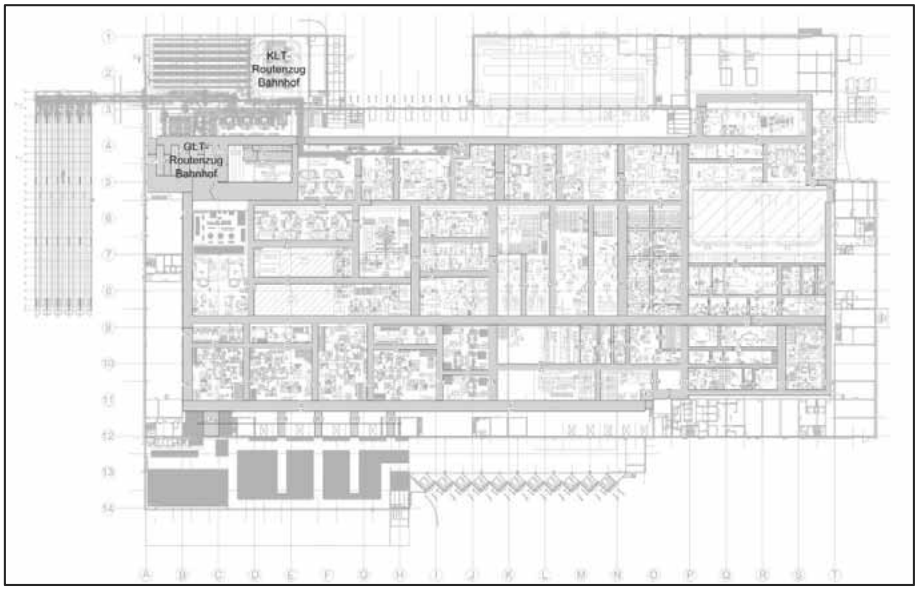


Abbildung 2: *Layout der Produktion mit den Fahrwegen für Routenzüge*

Im Gegensatz zu einem Werk, in dem Fahrzeuge montiert werden, ist die Wegeführung in diesem Produktionswerk viel verzweigter und die Wege zum Teil viel enger (s. Abb. 2). Dadurch gestaltet sich die Planung der Routen schwieriger, da die Anzahl an Kreuzungen und alternativen Fahrwegen wesentlich höher ist.

Aufgabe der Routenplanung ist es, die Routen so festzulegen, dass die Routen möglichst gleichmäßig zeitlich ausgelastet sind, die Transportkapazität nicht überschritten wird und möglichst wenig Züge benötigt werden. Weiterhin ist in der Routenplanung auch die Belastung der einzelnen Wege zu berücksichtigen. Die Fahrwege der Routenzüge sind so festzulegen, dass es zu möglichst wenigen Behinderungen zwischen den Zügen kommen kann.

5 Untersuchungsszenarien

Zunächst wird der aktuelle Planungsstand des Projektes im Simulationsmodell abgebildet. Die Routen für die KLT- und GLT-Routenzüge werden mit einer Sweep-Heuristik bestimmt. Dabei wird in der statischen Planung jede Route auf eine zeitliche Auslastung von 75% ausgelegt. Zusätzlich wird ein Ersatzzug zur Verfügung gestellt, der, falls ein Zug auf seiner Route mehr als fünf Minuten zu spät am Bahnhof eintrifft, dessen Tour übernimmt. In Experimenten werden die Einhaltung des Fahrplans sowie die Verkehrsbelastung auf Wegen und Kreuzungen (Anzahl Durchfahrten, Anzahl Wartevorgänge, Anzahl Überholvorgänge) analysiert. Insbesondere wird geprüft, ob die Materialverfügbarkeit an den Bereitstellorten als vorrangiges Ziel im Routenzugsystem gewährleistet ist.

Im zweiten Szenario wird überprüft, ob Fahrplaneinhaltung und Materialverfügbarkeit auch ohne den Ersatzzug eingehalten werden können. In diesem Fall könnte auf den Ersatzzug verzichtet und das System mit einem Zug weniger stabil betrieben werden.

Im dritten Szenario wird der Einfluss von weiteren Fahrzeugen, welche auch im Praxisbeispiel im Werk verkehren, untersucht. Dazu werden zusätzlich zu den bereits eingeplanten Routenzügen weitere Routen hinzugefügt, die jedoch Material aus anderen Quellen an andere Pufferflächen liefern. Wiederum werden Fahrplaneinhaltung, Verkehrsbelastung und Materialverfügbarkeit überprüft.

Im letzten Szenario wird die bisher zufällige Reihenfolge der Routen verändert. Nun wird die Reihenfolge so variiert, dass Routen, welche ähnliche oder gleiche Bereitstellorte versorgen und daher gleiche Fahrwege verwenden, in möglichst großem Abstand zueinander am Lager abfahren. Dadurch soll sichergestellt werden, dass Züge, die die gleichen Wege nutzen, nicht direkt aufeinander folgen und sich dadurch seltener behindern.

6 Wesentliche Erkenntnisse

Durch die Simulationsergebnisse konnten erste Erkenntnisse hinsichtlich der Layoutgestaltung, Routenplanung und Fahrplangestaltung gewonnen werden.

Allgemein konnte festgestellt werden, dass sich Behinderungen durch andere Routenzüge bei GLT-Routen stärker auf die Einhaltung des Fahrplans (Takt) auswirken als bei den KLT-Routen. Dies ist bedingt durch die kürzeren Zykluszeiten und den damit verbundenen höheren Takt auf den Routen, so dass es auch bei kleineren Störungen schwierig wird, den Abfahrtszeitpunkt der nächsten Tour einzuhalten. Bei einer GLT-Route wird ein hoher Anteil der Zykluszeit für das Fahren aufgewendet, durch Blockierungen steigt dieser Anteil im Vergleich zur Zeit für das Handhaben der Ladungsträger. Dieses Verhältnis ist bei den KLT-Routen

anders, denn dort wird ein hoher Zeitanteil für das Handhaben der Kleinladungsträger benötigt. Da oft mehrere KLTs an einer Haltestelle bereitgestellt werden, halten diese Züge auch länger an. Befindet sich ein GLT-Routenzug hinter einem KLT-Routenzug und kann an einer Haltestelle nicht den vor ihm befindlichen KLT-Zug überholen, überschreitet er mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit seine Zykluszeit. Für die Planung der Routen ist es wichtig, dass sich zeitliche Puffer für solche Blockierungen nicht prozentual von der Zykluszeit ableiten, z.B. +20% von der „Netto-Zykluszeit". Zeitliche Zuschläge für Störungen sollten sich vielmehr an der Wegstrecke und der Verkehrsbelastung der zu befahrenden Bereiche orientieren.

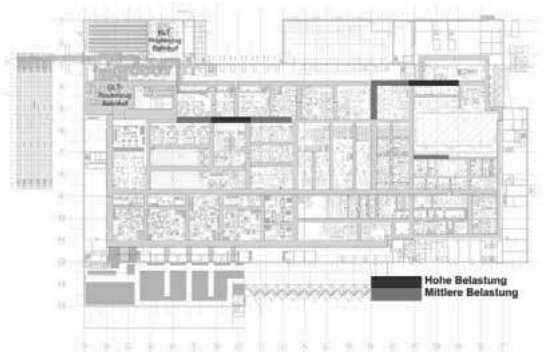


Abbildung 3: *Häufigkeit von Wartevorgängen dargestellt im Wegenetz*

In Abbildung 3 ist das Wegenetz dargestellt. In den markierten Bereichen kommt es zu häufigen Wartevorgängen. Routen die durch diese Bereiche geführt werden, sollten eine höhere Reservezeit aufweisen, damit die Einhaltung der Taktzeiten gewährleistet ist. Weiterhin sollten Routen diesen Bereich meiden, wenn dort kein Material bereitgestellt werden muss (Transit). Allein ein hohes Verkehrsaufkommen ist noch nicht ausschlaggebend um einen Bereich als störanfällig zu klassifizieren. Erst in Kombination mit Haltepunkten an Stellen, an denen nicht überholt werden kann, verschärft die Situation und führt zu einer Häufung an Wartevorgängen.

Die Simulation hat gezeigt, dass es trotz einiger Überschreitungen der geplanten Abfahrtszeiten zu keinen Materialengpässen in der Produktion gekommen ist. Die maximal zulässige Wiederbeschaffungszeit von 4 Stunden, auf dessen Basis die Produktionsbestände ausgelegt sind, konnte immer eingehalten werden.

Die Einhaltung der Wiederbeschaffungszeiten wird auch durch das Vorhalten eines Ersatzfahrzeuges sichergestellt, welches bei einer Überschreitung der geplanten Abfahrtszeit einspringt und die Tour übernimmt. In separaten Simulationsläufen wurden überprüft, welche Auswirkung der Wegfall dieses Ersatzzuges hat. Auch ohne den Ersatzzug konnte die zulässige Wiederbeschaffungszeit immer eingehalten werden. Nennenswerte Auswirkungen auf die Einhaltung der Abfahrtzeiten waren ebenfalls nicht erkennbar, dies liegt auch daran, dass der Ersatzzug erst zum Einsatz kommt, wenn der geplante Abfahrtszeitpunkt bereits überschritten ist. Der Ersatzzug hilft vielmehr beim Aufholen der Verzögerungen. Die durchschnittliche Zykluszeit je Tour stieg für KLT-Routen durch die fehlende Unterstützung des Ersatzzuges je

nach Tour um Werte zwischen fast 30 Sekunden und über 90 Sekunden an. Die genaue Einhaltung der Abfahrtzeiten kann Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: *Einfluss von Ersatzzug und Routenreihenfolge auf die mittlere Zykluszeit der KLT-Routen*

Route	Mittlere Zykluszeit (Referenz)	Mittlere Zykluszeit ohne Ersatzzug	Mittlere Zykluszeit mit neuer Routenreihenfolge
Rot	38,0 min	39,7 min	41,1 min
Blau	39,7 min	40,1 min	35,4 min
Grün	47,3 min	47,8 min	41,8 min
Lila	33,2 min	33,9 min	32,8 min
Gelb	33,3 min	34,7 min	35,2 min
Schwarz	26,5 min	27,1 min	27,5 min

Neben den im Fokus stehenden KLT- und GLT-Routenzügen gibt es weitere Verkehre im Werk. In einem weiteren Simulationslauf wurden auch diese abgebildet. Es kommt zu keiner wesentlichen Verschlechterung der Kennzahlen. Die mittlere Zykluszeit über alle GLT-Routen erhöht sich um 3 % auf 18,8 min/Tour. Ein ähnliches Bild zeichnet sich auch für die KLT-Routen ab, die mittlere Zykluszeit bleibt fast unverändert bei 36,2 min/Tour. Der zusätzliche Verkehr wirkt sich auch deshalb kaum auf die betrachteten Routenzüge aus, da diese Routenzüge nicht auf den Fahrwegen anhalten müssen, da es für sie separate Halteflächen gibt. Andernfalls wäre der Effekt auf die KLT- und GLT-Routen merklich größer.

Die Behinderungen zwischen den Routenzügen hängen von der Reihenfolge der einzelnen Züge zueinander ab. Für die vorangegangenen Aussagen, wurde die Reihenfolge der Routen zufällig gewählt. Die blaue, grüne und lila KLT-Route wurden nacheinander gestartet. Diese drei Routen haben einen ähnlichen Auslieferungsbereich und nutzen dadurch bestimmte Fahrwege gemeinsam. Bei diesen Routen kam es oft zu Überschreitungen der geplanten Abfahrtszeiten, so dass alleine für die grüne KLT-Route auf jeder fünften Tour der Ersatzzug einspringen musste. Wird die Abfahrtsreihenfolge der Routen so gewählt, dass diese drei Routen nicht nacheinander abfahren, so verbessert sich die Einhaltung der Abfahrtszeit deutlich (s. Tab. 1). Allerdings führt die veränderte Reihenfolge bei den anderen Routen zu einer Verschlechterung der Termintreue. Es bleibt damit festzuhalten, dass die Abfahrtsreihenfolge die Behinderung zwischen den Routen beeinflusst. Da es sich aber um ein komplexes und dynamisches System handelt, können die gesamtheitlichen Auswirkungen von Veränderungen durch alleiniges Abwägen und Überlegen nicht erkannt werden. Für die Fahrplangestaltung empfiehlt es sich allerdings, einfache Regeln zu definieren, die die Reihenfolge der Routen festlegen. Eine gemeinsame Betrachtung von KLT- und GLT-Routen ist aufgrund der unterschiedlichen Taktzeiten schwierig. Dieser Ansatz wird für diesen Anwendungsfall nicht weiter in Betracht gezogen.

7 Fazit

Die Planung und Steuerung von Routenzügen in Produktionssystemen ist eine komplexe Aufgabe, bei der viele Wechselwirkungen berücksichtigt werden müssen. Durch eine reine analytische Betrachtung sind diese Wechselwirkungen nicht vollends abzubilden. Es empfiehlt sich bei größeren Änderungen oder der Einführung die Planungsergebnisse mit Hilfe einer Ablaufsimulation abzusichern. Durch das erstellte generische Simulationsmodell lassen sich mit geringem Aufwand unterschiedliche Wegenetze und Layouts abbilden. Die dortige Verkehrssituation und ihre Auswirkung auf die Materialverfügbarkeit und Prozessstabilität können analysiert werden. Somit können Planungsstände überprüft, Handlungsempfehlungen abgeleitet und Verbesserungsmaßnahmen vor der Umsetzung erkannt werden. Im dargestellten Anwendungsfall sind die Simulationsergebnisse in die weitere Planung eingeflossen. Weiterhin wird das erstellte Simulationsmodell auch zur Untersuchung anderer Routenzugsysteme eingesetzt.

Literatur

Dewitz, M.; Galka; S., Günthner W.A.:Drive-Thru Loading Concept for In-Plant Milk Runs. In: Proceedings of the XX International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics. Belgrad: University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering 2012, S. 237-242.

Günthner, W.A.; Galka, S.; Klenk, E.; Knössl, T.; Dewitz, M.: Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport. Garching bei München: Lehrstuhl fml 2012.

Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 29-36.

Roth, S.: Virtuelle Logistik- und Materialflussplanung in der digitalen Fabrik. München: Forum Automobillogistik 2013.

Schenk, M; Tolujew J.; Reggelin, T.: A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Logistics Networks. In: Logistics and Supply Chain Management: Trends in Germany and Russia. Moskau: Publishing House of the Saint Petersburg State Polytechnical University 2008, S. 58-67.

Krejzewicz, D; Erdmann, J., Behrisch M., Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5 (2012) 3&4, S.128-138.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulation of a Logistics Network to Import Goods with Unknown Risk to Increase the Security in the Supply Chain

Simulation eines Logistik-Netzwerks zum Import von Gütern mit unbekanntem Risiko zur Stärkung der Sicherheit in der Supply Chain

Bernd Hellingrath, Carsten Böhle, Michael Middelhoff, Westfälische-Wilhelms Universität Münster, Münster (Germany), hellingrath@ercis.uni-muenster.de, carsten.boehle@wi.uni-muenster.de, michael.middelhoff@wi.uni-muenster.de

Abstract: The simulation model used in this paper compares potential setups of processes and screening devices for the identification of threats like weapons or explosives hidden in physical shipments transported by a logistics service provider (LSP). The model specifically addresses the problem of uncertainties in the occurrence and identification of threats considering type 1 and type 2 error probabilities. Scenarios varying in their use of buffers and screening technology are evaluated towards their resource occupation and resulting threat identification rates. The presented model is able to compute reliable results under uncertainty in threat occurrences and reveals influences on the behaviour of multi-tiered screening systems.

1 Introduction

The amount of goods imported into Germany accounts for up to 90 billion euros every month (Statistisches Bundesamt 2013). From the annual report of the Federal Customs Administration of the Federal Ministry of Finance one can quote that in 2011 about 30,000kg of drugs have been imported and discovered in the overall import of Germany (Bundesministerium der Finanzen 2012). In comparison to prior years this accounts for an increase of over 10%, not considering the possible unknown cases. Also, an increase in weapons and ammunition has been recoded. Likewise, a study organized in 2012 by the World Customs Organization targeted at drug trafficking via mail and express channels (Operation SKY-NET) lists 9.5 tonnes of different drugs that were sent in more than 941 parcels. The study lasted 19 days and was supported by 68 member countries (World Customs Organization 2012).

International trade and globally traveling passengers open up a variety of vulnerabilities for civil security. Each shipped item via logistics service providers

(LSP) and every passenger entering the country via air, land or sea might be a source of danger. This issue has been known since decades and especially considered in air travel and cargo transport. Considering these various possible points of entry into a country, one of the most important difficulties in securing civil security is the enormous amount of shipments and passengers each day. This results in huge uncertainties on threat occurrences and creates the need to find efficient and effective means to verify the security of incoming goods and people from outside the country.

Objects of interest to the presented approach are arbitrary physical goods which are imported by an LSP and might contain hidden threats. LSPs are considered as active agents, who implement security measures (here screening technologies) to protect civil security. At the same time they are also part of the infrastructure at risk. The LSPs have an own interest to protect their facilities, employees and customers, motivating investments in improved security means. The threats considered in this paper are dugs, weapons, radioactive matter and explosives. To protect the population from these illegal imports, different screening technologies next to handing over shipments to authorities, which are allowed to perform a physical inspection by opening shipments, can be used, that leave the item unopened and undamaged. Examples are imaging technologies like X-ray or molecule analysis with ion-mobility-spectroscopy. Providing security comes at high costs for the installation and operation of screening devices and time required for screening. For a cost driven LSP this leads to a conflict between cost minimal operations, the provided service level and the security level. Further, complex multi-tiered screening systems are influenced by dynamics like variations in the workload caused by arrival times and schedules. For an analysis of these factors it is reasonable to analyse the system behaviour in different scenarios using a simulation study. According to the guideline VDI 3633 of the Association of German Engineers, it is suitable to use simulation to analyse non-existing systems under high uncertainty, given in the unknown distribution of threat occurrences (Verein Deutscher Ingenieure 2000). Considering process durations influenced by waiting times and probabilistic routing decisions in a multi-tiered setup results in complex interdependencies, which can be observed using simulation (Rabe and Hellingrath 2001).

In this paper we present a simulation model of an import hub in a national network of an LSP. The hub is supplied with imports from outside Europe. Different scenarios observe the system's behaviour under varying process configurations and installed technology. Shipments are filtered according to a prior risk assessment. First, section 2 introduces related studies of similar multi-tiered screening systems. Section 3 introduces the context of the LSP and lays out general conditions the simulation is based on. After this, section 4 gives details on the simulation model, explains underlying assumptions and describes the screening technologies. The different scenarios and results are presented in section 5. Finally, section 6 summarises the findings and gives an outlook on the further development and open research questions.

2 Aviation Security Screening

A variety of related studies is published in the context of aviation security. This is driven by the historical evolution of protecting civil security from terrorist activities like the attack on the World Trade Centre in the USA on September 11, 2001. Sewell et al. recently presented a mathematical security screening device allocation model for optimal allocations of aviation security screening devices across a set of airports (2013). They show that the problem is mathematically solvable under time and budget conditions including a passenger pre-screening to assign passengers to groups of a perceived risk level. Each group is assigned with a specific screening program, which the passengers have to undergo to get cleared for boarding. The importance of a risk-based assessment of passengers and an according screening plan for each group is especially stressed by Butler and Poole (2002). They compare different screening technologies and argue on the high amount of passengers and low capacities of screening devices. Following their argument, a prior risk assessment and group specific screening resource assignment is crucial to address the amount of passengers. In aviation security, the allocation of screening devices and a risk based grouping is widely used to develop effective and efficient screening models (Nie et al. 2009; Sewell et al. 2002). Earlier, Kobza and Jacobson showed the effectiveness of multiple-device systems compared to single-device systems and the importance of error probabilities of type 1 (false positive) and type 2 (false negative) in general access security systems (1997). No approach has been found that is able to take the dynamics of the screening process into consideration. Due to the high number of items and the huge uncertainty, some dynamic characteristics will become important, e.g. arrival times and the resulting fluctuations in workload. Further, none of the approaches considered a dynamic screening based on the item information and the current system state. The situation in the logistics context is also different from aviation in so far as private data might be concerned, which is particularly protected for certain shipments and cannot be used for pre-screening.

3 Problem Statement

The model is loosely based on a real world case of a logistics company importing large amounts of shipments from various countries into Germany. Criminals and terrorists try to ship drugs, explosives, weapons or radioactive material via the LSP by abusing its service. Considering the total amount of shipments, the cases of items actually containing threats can be seen as very low. To address the high uncertainty of threat occurrences, an assumed threat distribution over countries of origin was defined. Based on the long term experience of the LSP, the developed distribution is structured as follows. Each origin is assigned with a general threat probability and conditional probabilities determining the chance by which a specific threat is present. The origins are divided into three categories of secure (5% of all origins), dangerous (5%) and medium risk countries (90%). Countries known to be secure have low general threat probabilities (~1%), whereas the majority of countries have medium (~5%) and dangerous countries relatively high probabilities (~10%). An example is the USA, which are considered to deliver secure shipments, leading to a low general threat likeliness of about 1%. The distribution of threats is 60% drugs, 10% explosives, 5% radioactive matter and 25% weapons.

The import hubs receive different amounts of shipments via air and land transport during the day, sorts them according to their destinations and finally directs them into the national network, which is omitted here. Potential threats are supposed to be detected at the point of entry in the network. The LSP is not informed about single items before they arrive, so prior filtering based on information is not possible. Therefore, the risk of a single item can first be assessed once the item has been received in an inbound gateway and the relevant information like the origin is recorded. The risk assessment will create a risk profile for each item based on the presumed threat distribution of the country of origin and additional know-how in assessing visible indications. It is not supposed to analyse any personal information such as names and addresses of the sender and the receiver. It will specify for an item the likeliness for each of the threats. Based on the risk profile, items are routed individually through the screening devices in case a multi-tiered screening setup is installed. Screening technologies are characterized by their ability to detect certain threats (cf. Table 1). They are assigned with type 1 errors, the likeliness of false threat detection, and type 2 errors, the likeliness of false clearance, for each of the threats. This influences the routing of each item and the capacity utilization of screening devices. The set of available technologies consists of X-ray, terahertz spectroscopy (THz) and ion-mobility-spectroscopy (IMS). These have been selected, because they are candidates to be implemented at the hub and are different in their mode of operation, required time, and detection quality, but also costs for acquisition and operation. Detailed information on the screening technologies is given in the next section.

4 Model Definition

Based on the problem we created a discrete event-simulation model, which represents the screening setup from receiving the item until passing it on to sorting, i.e. assuming that there is no threat, or physical inspection. Each physical shipment is observed as a distinct item. The model is reduced to one hub location as all hubs in the network of the LSP share the same setup and processes. By omitting the internal network procedures, there are further no interdependencies among the hubs. The model starts with the creation of items according to a fixed plan, describing the amount of shipments routed to the hub for each day over one year. From an initially defined general threat distribution by origin, a specific threat from the four categories is drawn by chance. This distribution is constant and simulates the threat likeliness unknown in reality.

After the items are routed to the hub, they are processed by a risk assessment function, which will probabilistically ascribe a risk based on the presumed threat distribution of the origin. Additionally, the risk assessment makes use of further individual item information. It is assumed that information like size, weight and declared content can be evaluated to assess the risk. As this information is not part of the model, it is replaced by a probability to identify an occurred threat. This is uniformly distributed between 1% and 13%. That means, any parcel has a basic threat level depending on its origin, and in case it actually does represent a harmful item, the threat level is additionally increased. As a result, a harmful parcel from a dangerous country (10% threat likeliness) is at most considered to be risky with a probability of 26%. This low number is justified by the scarce information available

to assess the risk. Since high risk items therefore would mostly not be sent to screening, the assessed risk is additionally scaled up to 100% likeliness to be selected for screening. The highest threat level of 26% is consequently always routed to screening in case of item-level risk assessment. An overview of the simulation model is given in figure 1.

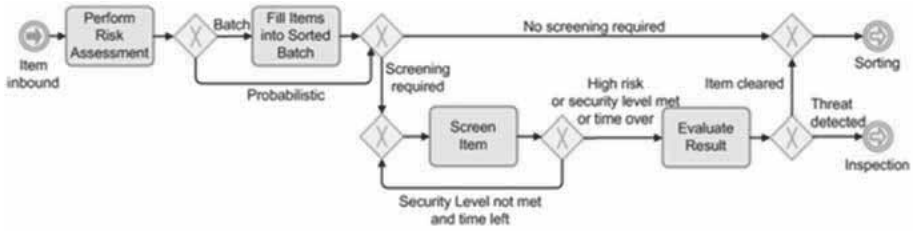


Figure 1: *Overview of Simulation Model Sequence*

Depending on the created risk profile, each item is then routed through the available screening devices, considering error probabilities of false positives and false negatives. Routing decisions are based on the current most likely threat of an item and the detection capabilities of devices. The model defines a screening accuracy of 90% as termination criterion for the screening. This causes items to pass screenings until the presumed risk for each of the four threats falls below 10% or one of the risks increases to over 90%. Screening technologies influence the item's risk values based on their error probabilities. The lower the error probability, the stronger is the increase or decrease of the risk values, since the result is more reliable. Thereby the most likely threat might change over time. Additionally, each item has to be processed at the day of arrival in order to maintain service quality. The maximum processing time is therefore 24 hours. Items are ascribed to contain a threat, if at least one of the screening devices has detected it and the risk value for this threat is above the security level of 90%. In case a threat is detected, the item is sorted out for further physical inspection by authorities. Secure items proceed in the regular sorting process of the LSP. If an item has not reached 90% accuracy and there is no time left, it will be cleared and no further screening is performed. This increases the influence of dynamics like schedules and arrival times.

The model does not evaluate cost factors of the screening system in the scenarios. It can be assumed that increased effort will also increase the cost of a given configuration. In case of successfully introduced threats into the supply chain, there are not clear economic losses available. Considering that for instance explosive devices put several human lives at risk and imported drugs cause severe socio-economical costs, it is very difficult to relate the system costs to the prevented damage. Therefore, it is more suitable to argue on the percentage of prevented threat instances. The cost estimation is thereby only a limitation of investments. Due to the huge uncertainty, the model does not address an optimization of the effort-to-cost relation, as related mathematical models do. It rather seeks to analyse dynamic components and in later studies intelligent attackers.

4.1 Assumptions

To reduce model complexity to the most important influences, it is based on assumptions which address the occurrence of threats and the application of screening technologies as well as their evaluation. 1) Each shipped item can contain at most one threat. Driven by the experience of the LSP, it is very unlikely that a mixture of threat categories is contained in one item. 2) No dependencies exist between screening technologies or multiple executions of the same technology. Previous screening results might improve further screenings due to combined information, which his omitted in the model 3) The quality of the screening is independent of the single object. The model does not differentiate physical properties of items, which might influence threat detection probabilities.

4.2 Screening Technologies

This section shortly introduces the screening technologies, which are used in the model. The technologies are outlined by their screening procedure and characterized with error probabilities for the threat types. Roentgen radiation or X-ray is a well-researched technology, which makes use of the property that radiation is penetrating matter in different strengths. By analysing the amount of radiation, which was able to pass through an object, it is possible to infer the materials beneath surfaces. Analysing hidden outlines of objects and matter density allows concluding on threats. Terahertz spectroscopy (THz) also makes use of matter's property to react differently to radiation. THz radiation does not penetrate dense matter but is able to give precise images of objects beneath clothes or packaging. By varying radiations, it is possible to detect objects beneath different layered materials. THz will be used in two configurations with different processing times and accuracy. Ion-mobility-spectroscopy (IMS) is the only air sample screening technology applied in this context. It utilizes the property of molecules to retain a certain drift velocity in a magnetic field. Simplified, this velocity is lower the lager a molecule is. Thereby it is possible to determine the contained matter components of an object in very short times. It cannot be used to give a visual insight into an object, but it is precise in identifying matter, which diffuses substances into air. Table 1 shows the approximate detection rates of the different screening technologies by specifying the error probabilities for false threat detections and false clearance. Based on these values, the model will make probabilistic detection decisions. Note that IMS cannot be used for the detection of radioactive matter and weapons.

Table 1: *Screening Technologies Detection Rates*

Tech.	Time [min]	Drugs			Explosives			Radioactive			Weapons		
		Able	E 1	E 2	Able	E 1	E 2	Able	E 1	E 2	Able	E 1	E 2
X-ray	0.5	Yes	0.20	0.25	Yes	0.20	0.25	Yes	0.05	0.25	Yes	0.10	0.25
IMS	1.0	Yes	0.01	0.01	Yes	0.01	0.01	No	0.00	0.00	No	0.00	0.00
THzA	10.0	Yes	0.10	0.20	Yes	0.10	0.20	Yes	0.05	0.25	Yes	0.05	0.10
THzB	30.0	Yes	0.01	0.05	Yes	0.01	0.05	Yes	0.01	0.05	Yes	0.01	0.05

5 Simulation Scenarios

Simulation scenarios observe the system's behaviour to examine interdependencies under changing conditions. Each scenario is defined by a set of parameters and input values. To retain comparability, the environmental parameters remain constant. The following gives information on the scenario definition.

Constant among all scenarios is the arrival plan of items in the simulated year. Under realistic assumptions, about 1.5 million items have to be processed per year, which is an average daily workload of a little more than 4,000 items. Second, the screening termination criterions for each item are equal, which is the lower and upper bound of risk values and a time restriction of items to be processed on the day of arrival. Further, the evaluation of screening results and the decision on a detected threat is constant as defined by the model. Finally, each scenario has two variants. Variant A makes an item-based decision on whether to screen a parcel or not. The probability of being screened is then dependent on the perceived risk consisting of country-specific risk and additional information. Variant B uses a buffer to which 100 parcels are stored. When the buffer is full, 15% of all items with the highest risk assessment are forwarded to screening. The rest is cleared and routed to sorting. This split-up is similar to the percentage of screened items in the item-based decision of variant A, resulting from the underlying threat distribution. Therefore, screenings in both variants operate on an equal amount of items to retain comparability. Batched sorting has the effect that items with high risks are definitely screened, whereby the item-based selection always bears the chance that a high risk item is omitted due to the probabilistic decision.

5.1 Scenario 1: Single Device X-Ray Screening

The screening setup in scenario 1 only contains one X-ray device. This technology is one of the most common means and is very fast, but bears high error probabilities. With one device, the results give unaffected insights on the influence of the variant A and B, in which the process for the selection of items to be screened is modified.

The results shown in table 2 indicate a moderate ability to identify threats in the items. The occurred threats depict the fraction of items, which contained an actual threat. Screened items are the amount of items, which have been screened at least once. Evaluating the screening results, assumed threats are the percentage of all items declared as threat. In case the processing time of an item exceeds six hours, it is regarded as delayed and the percentage of such items is given. Finally, the identified threat percentage depicts the fraction of correctly identified threats. Note that the occurred threats and screened items will remain similar across the scenarios, because of the constant probabilities for threat occurrences and constant presumed risks. Variant A uses an item-based selection, using the presumed risk from the risk assessment. In 7% of all items, a threat is assumed which is nearly twice as much as threats have occurred overall. Of these, only 31% of the occurred threats have been identified correctly. Variant B has throughout all categories equal or improved rates. Threat detection obviously increased in accuracy, because fewer threats have been assumed and more threats have been identified. Additionally, the percentage of delayed items has decreased by 3%, which indicates an improved service level.

Table 2: *Scenario 1 Results*

Variant	Occurred Threats [% of all]	Screened Items [% of all]	Assumed Threats [% of all]	Delay > 6 hours [% of all]	Identified Threat [% of threats]
A	0.0351	0.1485	0.0636	0.1875	0.3088
B	0.0352	0.1482	0.0419	0.1587	0.4553
Difference	+0.0001	- 0.0003	- 0.0218	- 0.0288	+0.1465

With the same screening setup for both variants, the scenario results show that the use of a batched sorting by presumed risks has huge impact on the efficiency and accuracy of the system. Given the low required effort and investments for such a batched sorting, it is a suitable mean to improve the assignment of screening resources to the most risk-prone items.

5.2 Scenario 2: Multi-Tiered Technology Screening

Due to the high error probabilities of X-ray screening, it frequently occurs that a potential threat is assumed in an item, although this is not the case. This requires additional screenings to make precise decisions. In scenario 1 the item would have passed the X-ray device multiple times, each time affected by the high error rates. Scenario 2 therefore introduces the other two technologies, IMS and THz. In a first analysis, variant A again uses the item-based screening selection. This will give insights in the potential of the multi-tiered screening setup without the positive influences of the batched sorting. Variant B finally combines the multi-tiered screening with batched sorting.

Table 3: *Scenario 2 results*

Variant	Occurred Threats [% of all]	Screened Items [% of all]	Assumed Threats [% of all]	Delay > 6 hours [% of all]	Identified Threat [% of threats]
A	0.0353	0.1500	0.0734	0.1930	0.5236
B	0.0352	0.1500	0.0531	0.1493	0.8280
Difference	±0.0000	±0.0000	- 0.0203	- 0.0437	+0.3044

First, one can see in table 3 the improved identification rates of threats. Variant A even exceeds the batched sorting from scenario two. This shows that the multi-tiered screening has the higher improvement impact. The longer processing times of the advanced screening technologies become visible in the slightly increased percentage of delayed items. Remarkably, variant B exceeds all previous results with significant improvements. With 83% of identified threats and the lowest delay of 15%, it is a

very accurate and effective configuration. The batched sorting combined with an improved allocation of screening resources to the threat categories bears high potential. Compared to the first results from scenario 1A the identification rate has been increased by 50% with at the same time fewer assumed threats and delays.

The increased complexity of the multi-tiered screening setup demands an efficient assignment of items to the screenings. Items with high risks are forced to enter the screening because of batched sorting. Item-based routing decisions enable a targeted use of the system's screening capacities.

5.3 Evaluation

Over the scenarios it has been shown that there are different possibilities available to increase the quality and efficiency in screening systems. The model further revealed influences of the uncertainty in the distribution of threats. Variant A probabilistically selected items to be screened, based on the assumed threat distribution, which by no guarantee has to be accurate in real scenarios. To cover this lack of information, the presented batched sorting can be applied. This results in setting information in context so that items with the highest risk level within a subset of all items will always be screened. It has been found that both batching and using multiple screening technologies positively influence detection probabilities. The effect of multiple technologies is stronger under the assumptions made for this study. A combination of both leads to the best results.

The results proof that the model is trustworthy and allows observations of the system behaviour and the influencing factors. Yet the model has been applied to a fixed arrival plan over the scenarios and the threat probabilities have been known for the occurrence of threats. Thereby, it becomes interesting to consider the dynamics of arrival plans and work load fluctuations and to introduce intelligent attack scenarios with insight knowledge on the system and routing decisions, using this information to strategically introduce threats into the system to minimize the change of detection.

6 Conclusion

The results from the simulation scenarios have shown that process configurations and technology availability have significant influence on threat detection. For the high amounts of individual items, a complete screening would require resources and efforts which most likely exceed capacities. LSPs face the same problems as aviation travel and transport, where next to resources also the service level is an important constraint. Delays have to be as short as possible and shipments should only slightly be affected by screenings. The presented results are in line with the related studies and clearly indicate the potential of risk-based screening. Furthermore it has been shown that risk assessment can be supported by process design. The availability of diverse screening technologies and their optimal allocation are an additional tool to improve the level of security.

In further studies we will reduce the assumptions for the model, like introducing interdependencies of screening technologies. Additionally, we will study variations of the probability distributions of the risk assessment. Also, adding more details of the processes in the hub, e.g. parcel handling and storage, might become necessary.

But also for the existing model, interesting variants can be tested, e.g. the effect of the buffer size on the detection of threats or a coupling of the likeliness to be screened with the current workload of screening devices.

The simulation model is a first step towards an analysis of the influence of environmental dynamics. The internal routing decisions based on the constantly adapted individual risk profile of items are valuable for defining and evaluating attack scenarios. This is especially important in case the attacker does have knowledge about the dynamics of the risk assessment and scanning procedures. It is then possible to deduce information on how to introduce malicious parcels in the supply chain. In the configuration presented in this paper (which is exemplary and in no way similar to a real one!), it would be preferable to send items in a plane which is scheduled to land shortly after a plane from the United States carrying a great number of safe parcels. Also, the average probability for a malicious parcel to be detected is less for an item the later it arrives during the day. Therefore, more advanced configurations might be necessary.

Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the German Federal Ministry of Education and Research in the context of the project “InPoSec” (FKZ: 13N12298).

References

Bundesministerium der Finanzen (Hrsg.): Die Bundeszollverwaltung Jahresstatistik 2011. Berlin: Bundesministerium der Finanzen, 2012.

Butler, V.; Poole Jr., R. W.: Rethinking Checked-baggage Screening. Los Angeles: Reason Public Policy Institute, 2002.

Kobza, J. E.; Jacobson, S. H.: Probability models for access security system architectures. Journal of the OR Society (1997) 48, pp. 255-263.

Nie X.; Batta, R.; Drury, C. G.; Lin, L.: Passenger grouping with risk levels in an airport security system. European Journal of Operational Research 194 (2009), pp. 574–584.

Rabe, M.; Hellingrath, B. (Hrsg.): Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik. Erlangen: SCS European Publishing House, 2001.

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Deutsche Ausfuhren im November 2012 unverändert zum November 2011. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt Pressestelle, 2013.

Sewell, E. C; Lee, A. J.; Jacobson, S. H.: Optimal allocation of aviation security screening devices. Journal of Transportation Security 6 (2013) 2, pp. 103-116.

Sewell, E. C.; Attagara, J; Kobza, J. E.; Jacobson, S. H.: Allocating explosive screening devices for aviation security. Journal of Transportation Security (2012) 5, pp. 141–155.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2000.

World Customs Organization: Customs operation nets exceptional quantities of drugs in postal parcels. Brussels: 20 November 2012.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation

Advanced integration of energetic consideration in discrete event simulation

Andreas Schlegel, Johannes Stoldt, Matthias Putz, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany), andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de, johannes.stoldt@iwu.fraunhofer.de, matthias.putz@iwu.fraunhofer.de

Abstract: In order to allow for truly holistic considerations, as intended in the Digital Factory concept, energy-related factors need to be considered. This has not yet been implemented for discrete event simulation (i.e. material flow simulation) in industrial companies even though it may foster the energy efficiency within production sites considerably. The reason for the lack of acceptance is that previously discussed approaches to a solution did not meet the user requirements. This paper discusses how a suitable extension, which allows for energy-related considerations within material flow simulation, can be developed paying heed to both user requirements and the state of the art. Opportunities for its utilisation as well as the associated extra time and effort are discussed by specific examples.

1 Einleitung

Mittels verschiedener Arten der Simulation sollen im Rahmen der Digitalen Fabrik Produktionssysteme ganzheitlich geplant, evaluiert und verbessert werden (VDI 4499-1 2008). Besonders die Materialflusssimulation erschließt große Verbesserungspotentiale, indem komplexe, stochastische Prozessketten innerhalb eines Produktionsnetzwerkes bei frei wählbarem Detailierungsgrad untersucht werden können. Das eingangs genannte Ziel der ganzheitlichen Planung wird allerdings nur lückenhaft und nicht in der gebotenen Tiefe seitens der marktverfügbaren Lösungen unterstützt. Vor allem im Zuge aktueller Aktivitäten zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion wurde festgestellt, dass gerade energetische Aspekte sowie Wechselwirkungen zwischen Produktionsprozess, Betriebsmitteln, versorgender und unterstützender Prozessperipherie, Fabrikgebäude und Umwelt nur mit erheblichem Aufwand untersucht werden können. Um diese Lücke zu schließen ist es erforderlich, die eingesetzten Werkzeuge weiterzuentwickeln.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Das Thema Energiesimulation nimmt in der neueren wissenschaftlichen Diskussion einen prominenten Platz ein. Folglich soll zunächst der Stand der Technik zusammengefasst werden.

Einen Ansatz zur simulativen Untersuchung energetischer Fragestellungen beschreibt Rager. Komplexe Prozesse werden mit dem Ziel unterteilt, energieintensive Teilprozesse zeitlich versetzt ablaufen zu lassen (Rager 2006). Zugrunde liegt das Konzept, Bedarfsspitzen zu verhindern, die sich als Summe einzelner Leistungsaufnahmeniveaus ergeben würden. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Solding und Petku (2005), welche konkrete Verbrauchsniveaus für einzelne Verbraucher und Teilprozesse definieren. Eine vergleichbare Lösung wurde von Wolff et al. (2012) vorgestellt und implementiert.

Die nächste Entwicklungsstufe für energetische Betrachtungen in Bezug auf die Detaillierung bildet die Verwendung approximierter Realkurvenverläufe, wie sie von verschiedenen Autoren beschrieben wird (Junge 2007; Schulz und Jungnickel 2012; Thiede 2012; Weinert 2010). Hervorzuheben sind v.a. die Arbeiten von Junge und Weinert, da diese ein hohes Maß an Flexibilität und Detailtreue ermöglichen. Zugleich bleibt festzustellen, dass hier das Dilemma zwischen erreichbaren Detaillierungsgrad und dazu notwendigen Datenaufnahmeaufwand (Zeit, Kosten) deutlich zu Tage tritt (Thiede et al. 2012). Folgerichtig ist bei der erweiterten Integration energetischer Betrachtungen in die Materialflusssimulation der Abstraktionsgrad für die Bedarfsverläufe genau zu wählen.

Um den Anspruch nach Ganzheitlichkeit zu erfüllen, ist es erforderlich, zusätzlich zur elektrischen Energie auch andere Energieträger bzw. energieübertragende Medien (z.B. Druckluft) sowie unter Energieaufwand bereitgestellte Leistungen der Produktionsperipherie (z.B. Beleuchtung) zu simulieren. Dies wird bislang jedoch nur von wenigen Autoren konkret beachtet (bspw. Schulz und Jungnickel 2012; Thiede et al. 2012). Auch fehlt den untersuchten Ansätzen ein generischer Ansatz, der es gestattet, verschiedenste Energie- und Medienflüsse zu untersuchen.

Eine bidirektionale Verknüpfung der Produktions- und Versorgungsprozesse, in der der Verbrauch unmittelbar vom Produktionsgeschehen und die Möglichkeit zur Bearbeitung wiederum von der Medienbereitstellung beeinflusst werden, ist bislang nicht im wissenschaftlichen Diskurs verankert. Lösungsansätze, die, wie von Junge (2007) und Thiede (2012) demonstriert, eine Kopplung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge verfolgen, lassen sich zudem aufgrund ihrer Komplexität schwer in Entwicklungsprozesse von Industrieunternehmen integrieren.

Stahl et al. (2013) sowie Wolff et al. (2012) haben erste Ansätze zur Umsetzung energetischer Betrachtungen in Plant Simulation vor Version 11 vorgestellt. Diese Software eignet sich im Besonderen zur weitreichenden Einführung energetischer Betrachtungen, da sie ein de facto Standard im deutschen Automobilbau ist. Dem Lösungsvorschlag von Stahl et al. (2013) wohnt nur eine geringe Flexibilität inne, da nur ausgewählte Grundobjekte von Plant Simulation für energetische Betrachtungen erweitert werden. Zugleich haben die Autoren eine Möglichkeit zur Betrachtung peripherer Systeme (Produktionsinfrastruktur) geschaffen. Wolff et al. (2012) haben im Gegensatz hierzu auf diese Betrachtungen verzichtet, sind davon abgesehen jedoch flexibler bei der Betrachtung verschiedener bestehender Modellelemente.

Ein in Plant Simulation ab der aktuellen Version 11 implementierte Ansatz für energetische Untersuchungen ist in seiner Funktionalität dem Ansatz von Wolff et al. (2012) sehr ähnlich. So werden „Energiezustände“ mit den bereits vorhandenen „Ressourcenzuständen“ abgeglichen um Statistiken über den Verbrauch einzelner Modellbestandteile zu erheben. Hierbei kann stets nur ein energieübertragendes Medium betrachtet werden. Alle Energiezustände sowie die Transitionen zwischen diesen sind fest vordefiniert und lassen sich nur in Bezug auf Leistungsaufnahme und Übergangszeit verändern. Im Unterschied zu Wolff et al. werden die Energiebetrachtungen nicht mittels einzelner, zentraler und spezialisierter Bausteine sondern unmittelbar in den bestehenden Materialflussobjekten durchgeführt. Interaktionen zwischen der bereitstellenden Infrastruktur untereinander und mit den Materialflussobjekten finden keine Beachtung, jedoch besteht eine bidirektionale Verknüpfung von „Energie-“ und „Ressourcenzustand“. Damit ist gemeint, dass gleichsam der Energieverbrauch vom Produktionsgeschehen abhängt und das energetische Abschalten zu einer Unterbrechung der Produktion führt.

3 Anforderungen an eine flexible Erweiterung

Ausgehend vom beschriebenen Entwicklungsstand mit den genannten Potenzialen und Defiziten wurde ein neuer Ansatz zur erweiterten Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation entwickelt. Dabei galt es, dem ganzheitlichen Anspruch der Digitalen Fabrik einerseits sowie den Anforderungen potentiellen Anwender (Integrierbarkeit in und Kompatibilität zu existierenden Planungswelten) anderseits gerecht zu werden. Hierzu wurden im Vorfeld sechs Kernforderungen definiert.

Aus den Anwendererfordernissen folgt, dass besonderes Augenmerk auf der Umsetzung einer generischen und flexiblen Lösung liegen muss, die sich an etablierten Standards und Vorgehensweisen orientiert. In Expertenbefragungen wurde deutlich, dass einer Integration von Energiebetrachtungen mittels spezieller Erweiterungsbausteine in bestehenden Planungswerkzeugen gegenüber z.B. der Verbindung von Materialflusssimulatoren mit weiteren, speziell für energetische Untersuchungen prädestinierten Simulationstools unbedingt zu bevorzugen ist.

Entsprechend dem Aspekt der Ganzheitlichkeit wird zweitens eine differenzierte Betrachtung aller Energie- und Medienflüsse zusätzlich zum Materialfluss gefordert. Vor allem bei der Abbildung von Produktionsprozessen und -anlagen reicht es nicht, sich im Modell auf Leistungsaufnahmen elektrischer Verbraucher zu beschränken. Zu berücksichtigen sind ebenso die jeweiligen Bedarfe an allen anderen Energieträgern wie Gas, an Prozessmedien wie Druckluft oder Kühlmittel sowie die Bereitstellung weiterer Prozessvoraussetzungen (PV) wie etwa Beleuchtung.

Zur Realisierung der Erweiterung wird drittens eine Umsetzung in Form generischer Module gefordert. Sowohl Anlagen der Produktion als auch jene der Infrastruktur, lassen sich energetisch nach dem systemtheoretischen Ansatz in gleicher Art beschreiben. Beide nehmen verschiedene Zustände ein, in denen sie als „Verbraucher“ bestimmte Energien, Medien und Prozessvoraussetzungen in Anspruch nehmen, andere dabei als „Erzeuger“ ihrer Umgebung zur Verfügung stellen (gewollt z.B. die Druckluft eines Kompressors, ungewollt z.B. die Abwärme einer Fräsmaschine) und dabei ggf. einen Materialfluss realisieren. Die Energiesimulation muss der Erzeuger-Verbraucher-Dualität Rechnung tragen.

Die vierte Forderung betrifft die detaillierte Abbildung von Betriebszuständen (BZ). Zur energetischen Beschreibung soll anlagenbezogen eine frei wählbare Anzahl an BZ dienen. Diese nehmen Einfluss auf die Intensität des Materialflusses, welcher bspw. im BZ „*standby*“ ruht. Zusätzlich definieren sie die bereitzustellenden eingehenden bzw. bereitgestellten abgegebenen Energie, Medien und PVs. Betriebszustandsübergänge werden in der fünften Forderung thematisiert. Differenziert wird zwischen programm- und ereignisgesteuerten Zuständen. Erstere werden aufgrund interner oder externer Schalthandlungen eingenommen, meist materialflussbezogene Ereignisse führen aus diesen dann zu den zweitgenannten BZ. Übergänge zwischen BZ nehmen eine definierte Zeit in Anspruch.

Als abschließende sechste Anforderung wird die Eignung der zu entwickelnden Module zur Erprobung und virtuellen Inbetriebnahme von Strategien und Softwaretools der energiesensitiven Produktionssteuerung definiert. Konkret betrifft dies deren Fähigkeit, wahlweise mit simulationsinternen und externen Steuerungsinstanzen, d.h. zusätzlicher Software, zu interagieren.

4 Implementation

Entsprechend der primären Kernforderung wurde eine etablierte Simulationslösung ausgewählt, die gleichermaßen einen konkreten Markt erschließt und die alle geforderten Grundfunktionen mitbringt. Die ausgewählte Software „Plant Simulation“ nimmt in vielen Bereichen eine Marktführerposition ein. Von zentraler Bedeutung war die enge Anlehnung an den VDA Automotive Bausteinkasten, der einen herstellerübergreifenden, weiterentwickelten De-facto-Standard für die deutschen Fahrzeugherstellern definiert (Mayer und Pöge, 2010).

Grundlage des entwickelten Ansatzes ist ein allgemeingültiges Komponentenmodell, mit dem sich gemäß der dritten Forderung alle in der Fertigung vorhandenen Elemente beschreiben lassen. Dieses ist in Abbildung 1 dargestellt und teilt sich in zwei grundsätzliche Ebenen. In der Horizontalen ist der Materialfluss versinnbildlicht, während in der Vertikalen der Energie- und Medienfluss angedeutet ist. Ersteren bildet Plant Simulation standardmäßig ab, während bislang (in V10.1) keine Funktionalitäten zum Abbilden des Verbrauchs und der Erzeugung von Energie und Medien gemäß Forderung 2 existieren.

Diese Aspekte werden im vorgestellten Ansatz durch einen zusätzlichen Baustein (eniBRIC) abgedeckt. Dieser kann als Einzelelement funktional eingesetzt werden, um bspw. ein Subsystem in der Fabrik abzubilden, welches Energien, Medien oder Infrastrukturleistungen bereitstellt (Druckluftkompressor, Lüftungsanlage, Beleuchtung etc.). Komplementär zu bestehenden Elementen der Plant Simulation Klassenbibliothek, zu denen auch alle Objekte des VDA Automotive Bausteinkastens gezählt werden können, bildet er den energetisch relevanten Input (z.B. Aufnahme an Elektroenergie und Kühlwasser einer Induktionserwärmungsanlage) und Output (z.B. Abwärme über Abluft und Kühlwasser) je Betriebszustand ab. Hierzu wurde eine Reihe spezifischer Methoden entwickelt, welche zusammen mit verschiedenen Informationselemente (Tabellen, Listen, Variablen) alle notwendigen Funktionen in einem einheitlichen Baustein mit definierten Schnittstellen bereitstellen.

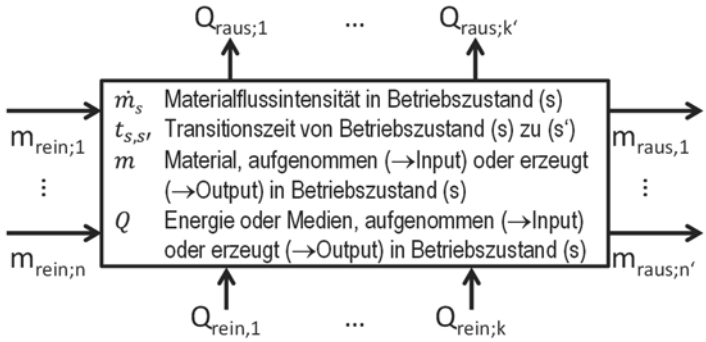


Abbildung 1: *Komponentenmodell von Produktionsmitteln und Infrastruktur*

Um dem angesprochenen Dilemma von Detaillierungsgrad und Datenaufwand zu entgehen, verwendet die entwickelte Erweiterung konstante Verbrauchsdaten pro Betriebszustand. Auf diese Weise kann die zusätzlich benötigte Rechenzeit auf ein Minimum reduziert werden. Beim Aufbau des Simulationsmodells werden für alle Komponenten die im Vorfeld bestimmten Betriebszustände hinterlegt. Diesen werden jeweils für Energie und Medium definierte Beträge als Input und Output zugeordnet.

Das Zusammenwirken der einzelnen Module ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass eniBRIC für jede betrachtete Komponente im Produktionssystem einzeln zu instanziieren ist, während der Auswerte- und der Konfigurationsbaustein einmalig im Modell sind. Zur Zuordnung von Erzeugern einzelner Medien an bestimmte Verbraucher (Anlagen, Peripheriesysteme) wird zudem ein zentraler Konfigurationsbaustein eingeführt. In diesem werden neben diesen Verknüpfungen von Betriebsmitteln und Infrastruktur auch globale Einstellungen hinterlegt, die das Verhalten einzelner Instanzen beeinflussen. Ein neuer Auswertebaustein dient zur Datenaggregation im Modell und erlaubt die simulationsbegleitende und abschließende Auswertung erhobener Daten. Bei Produktionskomponenten wird zudem – über Sensoren gesteuert – ein Informationsaustausch zwischen eniBRIC und den nativen Materialflussstationen realisiert. Hiermit kann beispielsweise der Effekt unterschiedlicher Energieverbräuche zwischen einer angeschalteten, wartenden und einer produzierenden Maschine abgebildet werden.

Während der Simulation kann der Betriebszustand der einzelnen eniBRIC Instanzen über eine standardisierte Schnittstelle verändert werden. Diese kann durch externe Anlagensteuerungssoftware oder von zusätzlich zu implementierender Steuerungslogik verwendet werden. Sobald ein Betriebszustandswechsel (Transition) initiiert wird, prüft die betroffene Instanz zunächst, ob ausreichend Kapazität für die benötigten Medien bei den jeweiligen Erzeugern (z.B. Trafostation oder Kompressor) verfügbar ist. Trifft dies nicht zu wird konfigurationsabhängig entweder der Wechsel blockiert bis der Mangel beseitigt wurde oder eine entsprechende Meldung wird ausgegeben. Sobald eine Transition beginnen kann, wird zunächst eine vordefinierte Zeit durchlaufen, während der sich das jeweilige Objekt im Wechsel befindet. Je nach Richtung des Wechsels verändert sich das In- und Output verhalten so, dass bis zum Erreichen des Zielzustands stets der maximale Verbrauch aber der minimale Output anliegt. Die verstreichende Zeit kann dabei individuell für jeden Wechsel in einen oder aus einem beliebigen Betriebszustand heraus definiert werden.

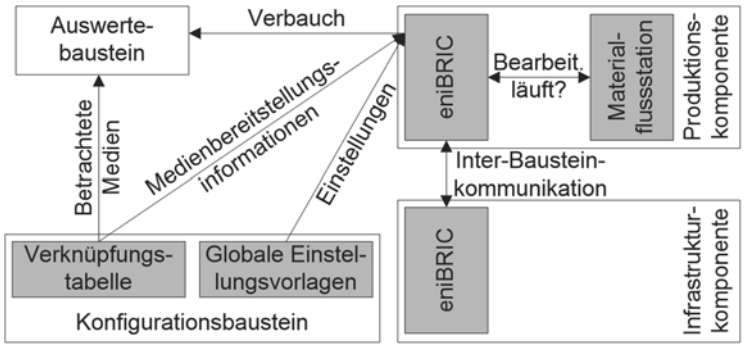


Abbildung 2: *Zusammenwirken der einzelnen Bausteine*

5 Fallstudien zum Einsatz von eniBRIC

Durch seine generische Konzeption ist eniBRIC sehr wandlungsfähig in seinem Einsatz. Dies wird nachstehend an konkreten Fallbeispielen illustriert. In diesem Zusammenhang wird zudem auf das resultierende Laufzeitverhalten der erweiterten Simulation eingegangen.

5.1 Simulation von Fertigungssystemen

In der industriellen Praxis werden ganze Fertigungssysteme unter anderem simuliert, um Dimensionierungen und Steuerungskonzepte zu verifizieren. Mittels eniBRIC ist es möglich in diesem Kontext auch energetische Betrachtungen durchzuführen und explizit energiesensitive Strategien und Software zur Fertigungssteuerung zu untersuchen. Dies wird nachfolgend an einem exemplarischen Produktionssystem demonstriert (Putz et al. 2012). Das betrachtete System (Abbildung 3) besteht aus fünf Arbeitsstationen, welche in einer getakteten Hauptfertigungslinie organisiert sind. Gemäß ihrer Anordnung im Materialfluss werden an diesen die Vorder- und Hintertüren (Fünf-Türer), die Motorhaube und die Heckklappe, die Vordertüren (Drei-Türer) und die Kotflügel montiert sowie eine Fehlerkontrolle durchgeführt.

Die vier erstgenannten Arbeitsplätze beziehen benötigte Teile von je zwei unabhängigen Subsystemen, welche aus einer bis fünf Arbeitsgruppen (als Einheit gesteuert) bestehen und jeweils durch Puffer von der Hauptlinie entkoppelt sind. Aus energetischer Sicht wurden unter anderem Beleuchtung, Druckluft, elektrischer Strom und Kühlwasser sowie die jeweiligen Erzeuger betrachtet.

In dieses Modell wurden verschiedene Methoden zur Steuerung der einzelnen Anlagen sowie der Fertigung implementiert (Stoldt et al. 2013), welche dem eniMES-Konzept (vgl. Putz et al. 2012) entstammen. Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass unter Verwendung dieser der Systemenergieverbrauch signifikant verringert werden kann, ohne dass mit großen Einbußen bei der Ausbringung des Gesamtsystems zu rechnen ist. Konkret lassen sich bis zu 18 % elektrische Energie einsparen, wobei ca. 0,2 % weniger Fahrzeuge gefertigt werden (Putz et al. 2012).

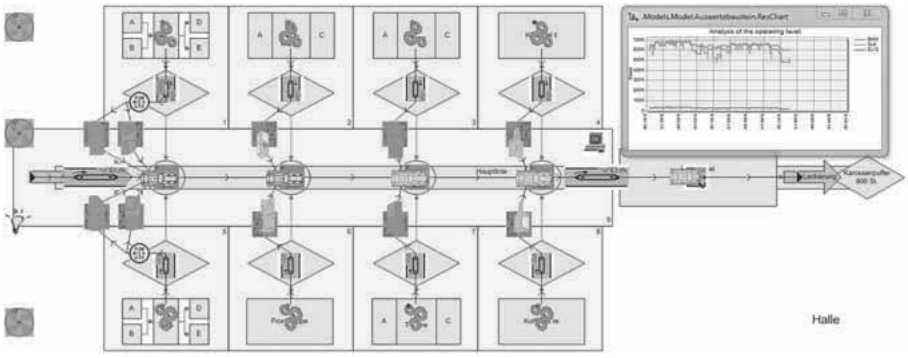


Abbildung 3: *Modell während eines Simulationslaufs*

Bei der Entwicklung von eniMES-Funktionen wurde das beschriebene Modell zudem genutzt, um verschiedene Fertigungssituationen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Möglichkeit zum Export aller relevanten Modellinformationen, wie etwa Abhängigkeiten oder Transitionszeiten, geschaffen. Diese Daten werden für die Untersuchung von Testszenarien in die eniMES-Software eingelesen. Während der individuellen Versuche werden, unter Verwendung einer OPC-basierten Realzeitkopplung, die einzelnen eniBRIC Instanzen durch die eniMES-Software gesteuert (Stoldt et al. 2013). Auf diese Weise ist es möglich, die entwickelte Lösung auch ohne zusätzliche Hardware für eine Vielzahl verschiedener Szenarien zu überprüfen. Daraus ergibt sich eine deutliche Effizienzsteigerung bei der Entwicklung derartige Software, welche voraussichtlich auch im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme zum Tragen kommt.

5.2 Modellierung von Anlagen mit veränderlichem Verbrauch

In Produktionssystemen kann zumeist nicht davon ausgegangen werde, dass alle betrachteten Betriebsmittel über ihre gesamte Betriebszeit hinweg einen konstanten Verbrauch haben. Ein klassisches Beispiel hierfür sind Wärmebehandlungsöfen, welche während einer einzigen Wärmebehandlung zum Teil verschiedene Temperaturprofile durchlaufen. Es lässt sich feststellen, dass der jeweils notwendige Energieeintrag vom Anstieg der Temperaturkurve abhängt. Qualitativ betrachtet muss besonders viel Heizleistung eingebracht werden, wenn die Temperatur angehoben wird. Soll sie unverändert bleiben, muss lediglich die entstehende Verlustleistung ausgeglichen werden. Ein Abkühlen kann entweder passiv, ohne Energieeintrag oder aktiv mit zusätzlicher Kühlleistung realisiert werden.

Gemäß diesen grundlegenden Zusammenhängen kann ein Wärmebehandlungsofen als einzelne Station mit einer eniBRIC-Instanz abgebildet werden. Der variable Verbrauch wird hierzu über mehrere Betriebszustände modelliert, welche zeitlich gesteuert nacheinander durchlaufen werden. Die genaue Reihenfolge kann hierbei als Information dem zu bearbeitenden Teil (BE) mitgegeben werden. Exemplarisch ist dieser Lösungsansatz in Abbildung 4 dargestellt. Im Teilbild a) ist das zu durchlaufende Temperaturprofil für zwei unterschiedliche Teilevarianten gezeigt. Der in b) gezeigte Graph zeigt das resultierende Lastprofil des Ofenmodells, wobei die Varianten in der Reihenfolge 2, 1, 2 (noch in Bearbeitung) den Ofen betreten. Unter

Verwendung einer einfachen Schaltlogik lassen sich somit auch langzyklische Veränderungen im Verbrauch ohne zusätzlichen Modellierungsaufwand abbilden.

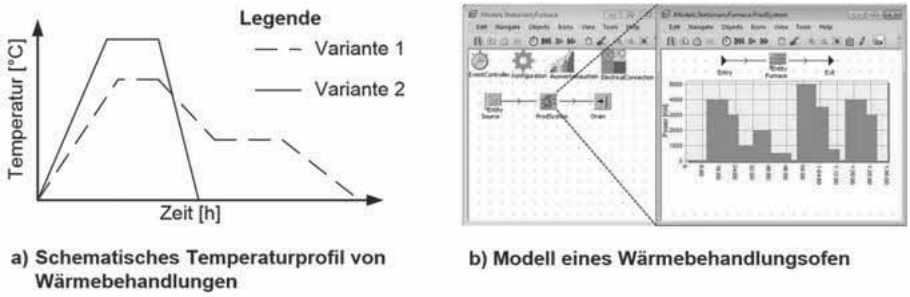


Abbildung 4: *Exemplarische Modellierung eines Wärmebehandlungsofens*

5.3 Erkenntnisse zum Laufzeitverhalten

Der Einsatz einer Erweiterung zur Betrachtung von Energie im Rahmen der Materialflusssimulation wirkt sich unmittelbar auf die Durchführungsdauer von Simulationsstudien aus. Insbesondere während der Phase der Datenermittlung, -aufbereitung und -abstimmung sowie der Simulationsexperimente ist mit einem Mehraufwand zu rechnen. Welcher Umfang an Daten benötigt wird, ist in diesem Zusammenhang von der Anzahl der modellierten Anlagen und der Art des angenommenen Verbrauchsmodells ab. Letzteres wurde bei eniBRIC auf den einfachsten anzunehmenden Fall des konstanten Verbrauchs reduziert, aus welchem Grund der tatsächliche Mehraufwand vor allem von der Datenakquise abhängt.

Die zusätzlich für die Durchführung der Simulationsexperimente benötigte Zeit ist ebenfalls vom Verbrauchsmodell sowie von der Implementation abhängig. Da eniBRIC in der Lage ist eine beliebige Anzahl unterschiedlicher Medien abzubilden, ist der zusätzliche Rechenaufwand zudem von der Menge betrachteter Medien abhängig. Diese Zusammenhänge wurden mittels eines Modells eines deutschen OEM mit 779 Facility-Objekten des VDA Automotive Bausteinkastens untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst (Originallaufzeit: ca. 30 min).

Besonders bemerkenswert ist hierbei, dass bereits die Vorbereitung zur Installation von eniBRIC, hier die Einbindung der entsprechenden Klassenbibliothek sowie das Hinzufügen weiterer, nicht automatisch ausgeführter Methoden, die Simulationszeit verlängert. Der Grund hierfür konnte bislang nicht genau bestimmt werden. Wurden alle Facility-Objekte mit eniBRIC erweitert, stieg die Rechenzeit um ca. 13 % an, was aus zusätzlichen Sensorabfragen beim Ein- und Austreten von BE resultiert. Die weiteren Szenarios untersuchten spezifische Einstellungen bezüglich der Datenerfassung. Im Minimalszenario wird lediglich der Gesamtverbrauch des Modells ermittelt, während bei „voll global“ die Momentanlast über die Zeit sowie Informationen für eine objektspezifische Verbrauchsrekonstruktion (offline) erfasst werden. Das Maximalszenario sieht darüber hinaus ein getrenntes Loggen der Verbräuche aller Instanzen von eniBRIC vor. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei rationeller Datenerfassung mit eniBRIC auch mehrere Medien abgebildet werden können, ohne die Simulationsdauer mehr als zu verdoppeln.

Tabelle 1: *Ergebnisse zur Studie des Laufzeitverhaltens*

Szenario	1 Medium	2 Medien	3 Medien
Vorbereitet	104,48 %	104,48 %	104,48 %
Installiert (aus)	112,63 %	112,63 %	112,63 %
Installiert (minimal)	149,84 %	157,86 %	165,12 %
Installiert (voll global)	157,41 %	172,78 %	184,77 %
Installiert (maximal)	173,66 %	193,23 %	211,37 %

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Ansatz zur erweiterten Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation gestattet eine umfassende Analyse des Ressourcenverbrauchs in Produktionsprozessen. Er kann zum energetischen Vergleich von Planungsvarianten der Fabrik- und Strukturplanung, zur dynamischen Dimensionierung von Infrastrukturanlagen sowie zur Bewertung energiesensitiver Lösungen zur Produktionsplanung und Fertigungssteuerung eingesetzt werden.

Die Verwendung etablierter Simulationstools und Branchenbibliotheken stellt eine nahtlose Integrierbarkeit in industrielle Planungsumgebungen sicher. Durch das sehr gute Laufzeitverhalten der erweiterten Simulationsmodelle und die aufwandsarme Erweiterung bestehender Modelle werden wesentliche Barrieren überwunden, die heute noch auf Seiten der Anwender eine generelle, standardmäßige Anwendung der Ablaufsimulation zur Planung energieeffizienter Fabriksysteme verhindern.

Unter Verwendung von eniBRIC wird es überdies möglich entsprechende Outputs zu verfolgen um eine Verbindung von Materialfluss- und Gebäudesimulation herzustellen. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um den Einfluss des Produktionsregimes auf die zeitliche Entwicklung der internen Wärmelasten in einer Fertigungsumgebung nachzubilden. Somit wird eine energetische Bilanzierung und Optimierung über die bislang getrennt betrachteten Planungsbereiche und Leitebenen von Gebäude, Infrastruktur und Produktion hinweg möglich.

Künftige Arbeiten zielen u.a. darauf ab, hierfür eine noch bessere Datenqualität durch die Hinzunahme thermischer Betrachtungen zu erreichen. So soll die aus den bekannten Energieflüssen resultierende Erwärmung von Bauteilen und Betriebsmitteln sowie deren Wärmeabgabe und Abkühlung im Zeitverlauf des Transports und der Lagerung abgebildet werden. Damit können energetische Interaktionen zwischen Produktion und Gebäude untersucht werden und Prozesse mit einem engen thermischen Prozessfenster werden bewertbar.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse fassen Arbeiten zusammen, die im Rahmen der Projekte InnoCaT® und eniPROD® entstanden sind. Das vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschungsprojekt „Innovationsallianz Green Car Body Technologies„ wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen 02PO2700 ff) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Das Spitzentechnologiecluster „Energieeffiziente Produkt- und

Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®) wird finanziert aus Mitteln der Europäischen Union (Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung) und des Freistaats Sachsen.

Literatur

Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Dissertation, Kassel: Universität Kassel 2007.

Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard - Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens, in: Zülch, G. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 29-36.

Putz, M.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Franz, E.; Langer, T.: Methodik und Framework zur energiesensitiven Fertigungssteuerung in der Variantenfließfertigung. In: Müller, E.; Bullinger, A. C. (Hrsg.): Tagungsband „Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabriksysteme – VPP2012“. Chemnitz: TU Chemnitz IBF 2012, S. 131-140.

Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung. Dissertation, Augsburg: Universität Augsburg 2006.

Schulz, S.; Jungnickel, F.: A General Approach to Simulating Energy Flow in Production Plants via Plant Simulation. Tagungsband, 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Istanbul, Turkey, 31.10.-02.11.2012, S. 730-735.

Stahl, B.; Taisch, M.; Cannata, A.; Müller, F.; Thiede, S.; Herrmann, C.; Cataldo, A.; Cavadini Antonio, F.: Combined Energy, Material and Building Simulation for Green Factory Planning, in: Nee, A. Y.C.; Song, B.; Ong, S.-K. (Hrsg.): Re-engineering Manufacturing for Sustainability. Singapore: Springer Science+Business Media 2013, S. 493-498.

Stoldt, J.; Schlegel, A.; Franz, E.; Langer, T.; Putz, M.: Generic Energy-Enhancement Module for Consumption Analysis of Manufacturing Processes in Discrete Event Simulation, in: Nee, A. Y.C.; Song, B.; Ong, S.-K. (Hrsg.): Re-engineering Manufacturing for Sustainability. Singapore: Springer Science+Business Media 2013, S. 165-170.

Solding, P.; Petku, D.: Applying Energy Aspects on Simulation of Energy Intensive Production Systems. Tagungsband, 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, USA, 04.-07.12.2005, S. 1428-1432.

Thiede, S.: Energy Efficiency in Manufacturing Systems. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.

Thiede, S.; Bogdanski, G.; Herrmann, C.: A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies. In: Wits, W. W.; Jauregui-Becker, J. M.; Möhring, H.-C. (Hrsg.): 1st CIRP Global Web Conference: Interdisciplinary Research in Production Engineering (CIRPE2012), Elsevier 2012, S. 28-33.

VDI 4499-1: Digitale Fabrik – Grundlagen. Düsseldorf: Beuth 2008.

Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Dissertation, Berlin: Technische Universität Berlin 2010.

Wolff, D.; Kulus, D.; Dreher, S.: Simulating Energy Consumption in Automotive Industries. In: Bangsow, S. (Hrsg.): Use Cases of Discrete Event Simulation – Appliance and Research. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 59-86.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Modellierung und Simulation von Getränkeabfüll- und Verpackungsanlagen unter Berücksichtigung von Energie- und Medienverbräuchen

Modelling and Simulation of Filling and Packaging Lines under Consideration of Energy and Media Consumption

Theo Forster, Krones AG, Neutraubling (Germany), theo.forster@krones.com

Abstract: This article presents a discrete event simulation approach, to model filling and packaging lines with their quasi-continuous material flow realistically. The benefit of the solution lies on the one hand in the fast and flexible simulation framework, which can be also used by non-simulation experts on basis of an easy to use software frontend and pre-configured models of well-known line structures. On the other hand detailed modelling of control philosophies with the integration of real operating data is also possible and allows in depth analysis and optimization. Based on this, requirements and a modelling approach for energy and media consumption in material-flow simulation models will be presented. First results show a good approximation to real world behaviour. Industry related use cases show the potential applications.

1 Einleitung

Wirtschaftliche Anforderungen, sowohl von Hersteller- als auch von Betreiberseite, machen es erforderlich, Abfüll- und Verpackungsanlagen für die Getränkeindustrie, vergleichbar zu vielen anderen Produktionsanlagen, möglichst schlank und trotzdem hinreichend leistungsfähig zu gestalten. In diesem, von Produktion und Logistik geprägten Umfeld, stand bisher mehrheitlich die Bewertung leistungstechnischer Kenngrößen (z. B. Wirkungsgrad, Durchsatz und Puffergröße) während der Auslegung einer Anlage im Vordergrund.

Ohne die bisherigen Ziele zu vernachlässigen, stellen sich in Zukunft vermehrt die Fragen nach der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit einer solchen Produktionsanlage. Das heißt, das Verhältnis zwischen eingesetzten Ressourcen wie Strom, Wasser oder Betriebsstoffe und dem erzielbaren produktionstechnischen sowie wirtschaftlichen Nutzen, rückt in den Blickpunkt. Gründe hierfür sind besonders bei den steigenden Energiepreisen und folglich auch bei den zukünftigen Betriebskosten zu sehen. Die möglichst exakte Bestimmung von Energie- und Medienverbräuchen,

unter dem Aspekt der zeitlichen und zustandsbasierten Dynamik, stellt in der Auslegungsphase eine weitere wichtige Planungsgröße dar und ist Grundlage für den späteren ressourceneffizienten Betrieb. Aufbauend auf diesen Betrachtungen ergeben sich mehrere Anforderungen. Zum einen muss eine praxisnah nutzbare Datenbasis hinsichtlich realer Verbrauchswerte der Maschinen gebildet werden. Zum anderen müssen geeignete Simulationsmodelle erweitert oder neu entwickelt werden, um neben der klassischen Nutzung auch die Modellierung und Analyse von Energie- und Medienverbräuchen zu ermöglichen.

2 Stand der Technik

Der Einsatz der Simulation als Hilfsmittel für die Planung und Analyse sowie Optimierung von Systemen im Bereich der Produktion und Logistik hat sich seit langem bewährt und durchgesetzt (Banks et al. 2010). In Anlehnung an Eley (2012) kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass der Einsatz der Simulation für die Planung und Optimierung von produktionstechnischen und logistischen Systemen eine Vielzahl von Vorteilen bietet.

Auch im Bereich der Getränkeindustrie ist die Simulation mit dem Ziel der Planung und Optimierung von kompletten Abfüll- und Verpackungsanlagen seit über 15 Jahren etabliert. Recht umfassend beschreibt Rädler (1999) die Modellierung und Simulation von Abfüllanlagen sowie die Erhebung von Betriebsdaten. Auch die Arbeiten von Günthner und Kadachi (2001) sowie von Voigt (2004) sind in diesem Kontext angesiedelt und konzentrieren sich auf die Abbildung und Simulation von Getränkeabfüllanlagen sowie den Einsatz von informationstechnischen Methoden bei der Planung und Analyse. Aus Sicht der Hersteller von Abfüll- und Verpackungsanlagen sind, einhergehend mit dem Standardisierungsgedanken der digitalen Fabrik, die vollständig planungsbegleitende, schnelle Modellgenerierung und -parametrierung ebenfalls wichtige Aspekte (Bernhard und Kahe 2008).

Besonders Forschungs- und Anwendungsgebiete hinsichtlich der Ressourceneffizienz zeichnen sich in jüngerer Vergangenheit unter den Prämissen der sich ankündigenden Energiewende ab.

Aus Sicht der Abfüll- und Verpackungsanlagen sind vor allem Ansätze von Interesse, die ihren Schwerpunkt in der Betrachtung von Energie- und Medienverbräuchen haben und zugleich den Einfluss von Maschinenbetriebsverhalten untersuchen. Darauf aufbauend ist die programmtechnische Integration oder Kopplung in bestehende Simulationsmodelle, welche bisher primär den Materialfluss als Fokus hatten, von großer Bedeutung (Junge 2007).

Praxisrelevante Verwendung finden in erster Linie Ansätze, die sich oftmals auf spezifische Maschinentypen (z. B. Verpackungsmaschinen) konzentrieren (Schult 2011). Erste wissenschaftliche Ansätze für eine ganzheitliche Betrachtung einer kompletten Getränkeabfüllanlage zeichnen sich zwar ab, diese legen aber momentan den Fokus ihrer Betrachtung auf einzelne Verbrauchswerte, wie z. B. den Verbrauch von elektrischer Energie (Osterroth 2012).

3 Simulation von Abfüll- und Verpackungsanlagen

3.1 Anlagenstruktur

Abfüll- und Verpackungsanlagen können in Anlehnung an die DIN 8782 (1984) als „eine Gesamtheit der im Verbund zusammenwirkenden, einzelnen Aggregate zum Abfüllen von Getränken, einschließlich der vor- und nachgeschalteten Maschinen – in der Regel von der Eingabe des gepackten und gegebenenfalls palettierten Leergutes bis zur Abgabe des gepackten und gegebenenfalls palettierten Vollgutes“ definiert werden. Die typische Grundstruktur einer Anlage zum Verarbeiten von Einweg-PET Behältern (Abb. 1) beginnt mit der Streckblasmaschine, in welcher die Flaschen aus temperierten Vorformlingen, sogenannten Preforms in einem Streckblasprozess hergestellt werden. Anschließend werden diese im Füller bzw. Verschließer mit Produkt befüllt und verschlossen. Im nächsten Prozessschritt werden die Behälter an der Etikettiermaschine mit Etiketten ausgestattet. Die einzelnen Behälter werden anschließend in einer Verpackungsmaschine zu Gebinden verarbeitet, die beispielsweise aus einem Tray aus Karton mit einer darüber geschrumpften Folie bestehen können. Im abschließenden Verarbeitungsschritt werden Gebinde am Palletierer auf Paletten gestapelt und können dann entweder automatisiert über ein Materialflusssystem oder mit Hilfe eines Staplers in ein Lager verbracht oder direkt auf Lastwägen verladen werden. Dabei sind Abfüllanlagen geprägt durch teils sehr hohe Leistungen. Aktuell können diese bei Einweg-PET Anlagen bis zu 81.000 Fl./h betragen.

Die einzelnen Maschinen sind entweder direkt oder mit Transportsystemen miteinander verbunden, welche sowohl die Aufgabe des reinen Transports als auch der Pufferung bei Produktionsunterbrechungen erfüllen. Aus steuerungstechnischer Sicht bildet die sogenannte Leitmaschine (zumeist der Füller oder die Streckblasmaschine) das zentrale Aggregat in der Anlage. Die Leistung der vor- und nachgelagerten Maschinen sowie Bandgeschwindigkeiten der Transporteure werden über die Belegung der Transporteure mittels Sensoren und der Maschinenzustände gesteuert.

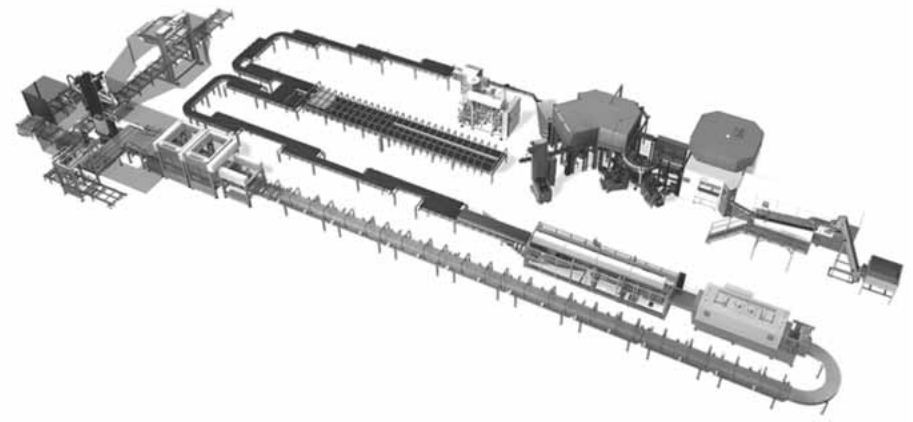


Abbildung 1: *3D-Darstellung einer Einweg-PET Abfüll- und Verpackungsanlage*

3.2 Modellkonzept

Die sehr hohen Anlagenausbringungen als auch teils äußerst komplexe Anlagenstrukturen im Mehrwegbereich liefern bereits erste Hinweise darauf, dass neben den bekannten Grundsätzen der Modellierung (Altiok und Melamed 2007) erweiterte Anforderungen hinsichtlich der ereignisdiskreten Modellierung von Getränkeabfüllanlagen beachtet werden müssen. Die Anzahl an gleichzeitig bewegten Entitäten, z. B. Flaschen, Gebinde und Paletten würde in einem Modell leicht 100.000 und mehr betragen, was zu einer Reduktion der Rechenperformance führen würde.

Die Krones AG nutzt dazu, aufbauend auf den Standardbausteinen von *Plant Simulation*, eine eigens entwickelte branchenspezifische Simulationsbibliothek mit Animation (Abb. 2), welche diesen quasikontinuierlichen Materialfluss performant abbilden kann. Der Vorteil an dieser Simulationslösung liegt darin, dass der eigentlich diskrete Materialfluss als Stoffstrom abgebildet wird, das materialflusstechnische Verhalten aller Objekte z. B. auf den Transporteuren oder in den Maschinen, aber ereignisdiskret interpretiert wird.

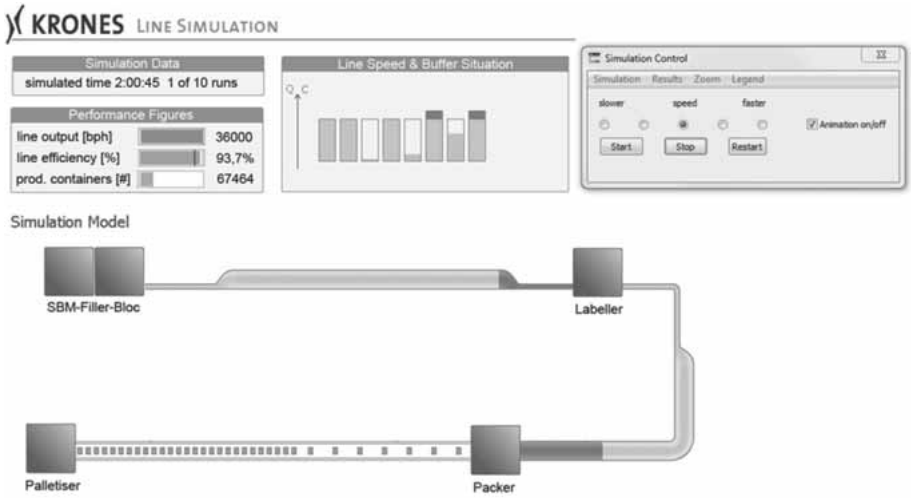


Abbildung 2: *Simulationsmodell einer Einweg-PET Anlage mit Steuerungsdialog*

Somit ist es realisierbar, den höchst möglichen Detaillierungsgrad (einzelne Behälter) aus materialflusstechnischer Sicht zu gewährleisten, ohne Performance Einschränkungen befürchten zu müssen. Ein weiterer Vorteil, der sich auf Basis dieses Modellierungskonzepts ergibt, ist, dass auch die in der Realität kontinuierlichen Stoffströme wie sie in Abfüllbetrieben bei prozesstechnischen Einheiten oder Tanks vorkommen modelliert werden können.

Die Vielzahl von branchentypischen Maschinen und Transportsystemen, mit ihren teils sehr unterschiedlichen Prozessverhalten, werden jeweils über spezialisierte Bausteine abgebildet, die einer validierten, bedarfsgerechten Detaillierung genügen. Aggregattypisches Betriebsverhalten, beispielsweise bei der Streckblasmaschine aufgrund der thermischen Prozesse, findet ebenso Berücksichtigung wie individuelles Ausfallverhalten der Aggregate auf Basis statistischer Verteilungen. Die Aufgaben,

die in der realen Anlage Stauschalter und Lichtschranken übernehmen, werden im Simulationsmodell über eigene Sensorbausteine abgebildet, um so, analog zur Wirklichkeit und angelehnt an reale Steuerungsmöglichkeiten durch die Speicherprogrammierbare Steuerung, einen harmonischen Betrieb ohne Stop-and-Go Verhalten auch im Modell umzusetzen.

3.3 Einsatzfelder

Die Anwendungsmöglichkeiten und Einsatzfelder der Krones Anlagensimulation orientieren sich am Lebenszyklus einer Getränkeabfüllanlage. In jeder einzelnen Phase zeigt sich, dass die digitale Absicherung der Planung mittels Simulation eine Schlüsseleigenschaft ist, um die Wettbewerbsfähigkeit der Betreiber einer solchen Anlage bestmöglich zu unterstützen.

3.3.1 Anwendungsfall 1 – Angebotsphase

Während der Neuplanung einer Einweg-PET Anlage für karbonisierte Softdrinks sowie stillem Wasser mit einer Leistung von 54.000 Fl./h soll analysiert werden, welche der diskutierten Konzeptalternativen die gesetzten Zielstellungen am besten erfüllen. Gemäß den initialen Kundenspezifikationen sollte die Anlage mit relativ hohen Leistungsreserven vor allem im Verpackungsteil, sowie mit entsprechend dimensionierten Pufferstrecken zwischen den Maschinen, ausgelegt werden. Dem gegenüber stand eine Variante mit angepassten Leistungsreserven, die den Vorteil auf sich vereinte, eine kompaktere Anlagenaufstellung durch den Einsatz kleinerer Maschinen zu ermöglichen.

Die konkrete Fragestellung bei der planungsbegleitenden Simulationsstudie war: Ergeben sich im Variantenvergleich Leistungseinschränkungen bei der Anlage? Untersuchungsgrößen waren der Anlagenwirkungsgrad als zentrale Leistungskennzahl, sowie die Rückstauhäufigkeit in Richtung Leitmaschine (Streckblasmaschine) und die Pufferbelegung für unterschiedliche Störszenarien während der Produktion. Nach Konzeption und Implementierung zeigten die Simulationsergebnisse für genannte Untersuchungsgrößen, dass keine leistungsreduzierenden Auswirkungen innerhalb der gesetzten Rahmenbedingungen prognostiziert werden konnten und so das alternative Konzept umgesetzt wurde.

Angestoßen durch häufig ähnlich gelagerte Fragestellungen sowie vergleichbaren Anlagenstrukturen, ist das Ziel verfolgt worden, bekannte, wiederkehrende Strukturen systematisch in teils vorparametrierte Anlagenmodelle zu überführen. Auf diese Weise kann ein schneller Konzeptvergleich für eine Vielzahl an unterschiedlichen Anlagenvarianten realisiert werden, um den zeitlichen Anforderungen in der Angebotsphase zu genügen. Die Nutzbarkeit dieser Standardmodelle erhöht sich weiter und erschließt sich auch einem breiteren Kreis von Nicht-Simulationsexperten, da ein eigenes Software-Frontend auf VB.NET Basis entwickelt wurde. Dies lässt eine bedienerfreundliche, schnelle Parametrierung und Durchführung von Simulationsexperimenten zu.

In Anbetracht der erwartet vielfältigen Einsatzhäufigkeit, wurde neben der bereits dargestellten Vorgehensweise ein weiterer Lösungsweg identifiziert, der auf die teilautomatisierte Modellgenerierung abzielt. Aufgrund eines einheitlichen Prozesses ist es möglich eine SAP Transaktion zu nutzen, mit Hilfe derer alle simulationsrelevanten Maschinen- und Anlagendaten aus dem bestehenden SAP Angebot exportiert

und über einen Zwischenschritt in die modellinterne Datenstruktur übertragen werden. Mit Hilfe eines integrierten Software-Moduls im Anwendungs-Frontend können dann Modelle für Einweg- oder Mehrweg-Anlagen automatisch generiert und anschließend simulativ bewertet werden.

3.3.2 Anwendungsfall 2 – Betriebsphase

Ein zweiter Anwendungsfall orientiert sich an den Anforderungen bei einem Restrukturierungsprojekt für eine bestehende Anlage. Der Kunde, eine große Brauerei mit mehreren, teils miteinander verbundenen Anlagen plante an einem Standort eine Modernisierung einer der bestehenden Anlagen. Hauptaugenmerk lag auf dem Bereich nach dem Füller, wo aktuell drei Etikettiermaschinen mit jeweils einem Drittel der nominalen Anlagenausbringung die Behälter verarbeiten. Häufig auftretende Produktionsunterbrechungen, die sich auf den Anlagenwirkungsgrad auswirkten sowie die Forderung nach neuen Ausstattungsmöglichkeiten der Flasche, machten eine Neustrukturierung notwendig.

Als Lösungsansatz erster Wahl wurde eine neue Hochgeschwindigkeits-Etikettiermaschine für die Anlage geplant, welche die bestehenden drei ersetzten sollte. Dem gegenüber stand die Befürchtung, dass der Verlust der teilweise vorhanden Redundanz nicht vollständig durch den deutlich höheren Maschinenwirkungsgrad einer einzelnen Maschine ausgeglichen werden kann.

Um eine belastbare Entscheidungsgrundlage zu schaffen, hat man sich dazu entschieden, den Ist-Stand der kompletten Anlage abzubilden. Dazu wurde ein sehr fein granulierter Modellansatz gewählt, der für alle Maschinen die individuellen Ist-Leistungskennzahlen berücksichtigt bzw. kundenspezifisch implementierte Steuerungsstrategien nicht außer Acht lässt. Anhand eines konzeptionellen Simulationsmodells wurde der Ist-Stand der Anlage abgebildet und in ersten Experimenten Simulationsergebnisse mit den Kennzahlen, welche im Betriebsdatenerfassungs-System ermittelt worden sind, verglichen. Während einer ersten Bewertung zeigte sich, dass es bei bestimmten Produktionsprogrammen zu möglichen Einschränkungen hinsichtlich des harmonischen Materialflusses kommen kann. Als Ursache hierfür konnte die noch bestehende Steuerungslogik in diesem Anlagenbereich identifiziert werden, die ein zu spätes Einsetzen der Leistungsregelung der neuen Maschine auslöste. Durch Optimierung der lokalen Anlagensteuerung und Anpassung der zuführenden Transportsysteme war es aber möglich darzustellen, dass auch unter schwankenden Produktionsrahmenbedingungen ein gleichbleibend hoher Anlagenwirkungsgrad realisiert werden kann.

4 Simulation von Energie- und Medienverbräuchen in Abfüll- und Verpackungsanlagen

Die bereits formulierten Anforderungen bezüglich Ressourceneffizienz in Produktionsanlagen sowie das gewachsene Bewusstsein für Nachhaltigkeit, auch im industriellen Sektor, weisen aus Sicht der Krones AG auf einen technologischen Beitrag hin, der es Betreibern einer Abfüllanlage ermöglicht, diesen Herausforderungen gewachsen zu sein. Ausgehend von diesen Prinzipien, hat Krones 2008 das vom unabhängigen Gutachter TÜV SÜD zertifizierte Programm *enviro* mit dem strategischen Ziel gestartet, einen Industriestandard für die Energie- und Medieneffizienz sowie Umweltverträglichkeit zu schaffen. Geleitet entsprechend

dieser Entwicklung und unter Einschätzung zukünftiger Einsatzgebiete, entstand die Idee, die bestehende Simulationslösung um eine energetische und medientechnische Sichtweise zu ergänzen. Zentraler Kern dieser neuen Aufgabenstellung ist der Entwurf und die Umsetzung einer Bibliothekserweiterung in einem Simulationsmodell zur Abbildung von Energie- und Medienverbräuchen in Abfüll- und Verpackungsanlagen. Der Nutzen dieser Entwicklung liegt in der Bewertungsmöglichkeit von Energie- und Medienverbräuchen unter zeitlich dynamischen Rahmenbedingungen.

Die Anforderungen an die Simulationslösung lassen sich wie folgt beschreiben:

- Abbildung aller wesentlichen Komponenten einer Abfüll- und Verpackungsanlage mit ihrem energetisch und medientechnisch prägenden Verhalten
- Skalierbarer Modellierungs- und Parametrierungsansatz unter Berücksichtigung von Datenverfügbarkeit und -granularität
- Erweiterbarer und modularer Modellaufbau in Hinblick auf das Anwendungsgebiet (Auslegungs- oder Betriebsphase, Analyse oder Optimierung)

4.1 Systemanalyse und Systemgrenzen

Anhand der Systemanalyse einer Einweg-PET Anlage sollen für diesen Beitrag die wichtigsten Komponenten sowie ihre inhaltlichen Abhängigkeiten dargestellt werden. Die Systemgrenzen bilden dabei die Streckblasmaschine sowie der Palettierbereich. Die planmäßige Beschreibung aller technisch in Betracht kommenden Verbräuche je Systemelement stand an erster Stelle. Zu den relevanten Größen zählen beispielsweise elektrische Energie, Druckluft, Wasser, Dampf, Säuren und Laugen sowie Gase wie etwa Stickstoff. Die weitere Analyse ergab, dass es aus Sicht von Energie- und Medienverbräuchen erforderlich ist, aufbauend auf den bekannten Materialflusszuständen, weitere Zustände sowie die dazugehörigen zeitabhängigen Zustandsübergänge zu bestimmen. Notwendig machte dies die Tatsache, dass Systemelemente bei gleichbleibendem Materialflusszustand unterschiedliche energetische Zustände einnehmen können. Auch beeinflusst die Abfolge der Materialflusszustände das energetische Zustandsverhalten.

So muss beispielsweise der Ofen der Streckblasmaschine nach längerem Stillstand wieder aufgeheizt werden. Der Bedarf an elektrischer Energie ist hier aber abhängig wie lange der Stillstand andauerte bzw. welcher Materialflusszustand (z. B. Wartend oder Produktion) zeitlich davor lag.

4.2 Datenerhebung und Aufbereitung

Die Datenbeschaffung und Aufbereitung ist ein maßgeblicher Bestandteil eines jeden Simulationsprojekts. Die für die Weiterentwicklung und den prototypischen Einsatz benötigten Verbrauchswerte von Maschinen und Prozesseinheiten waren zum Entwicklungszeitpunkt bereits in hinreichender Datenqualität vorhanden. Diese Informationsbasis entstand unter den Rahmenbedingungen des *enviro* Programms sowie weiterer Projekte, in welchen Energie- und Medienverbräuche im Produktionsbetrieb zustandsbasiert vermessen und nach Niveau und Verlauf analysiert wurden. Dank dieser Grundlagen, war eine Vergleichsbasis für den Verifikations- und Validierungsprozess geschaffen.

4.3 Modellkonzept

Das Modellkonzept, das auf Erkenntnissen aus Vorprojekten bzw. einer Abschlussarbeit von Feige (2012) basiert, folgt zwei wesentlichen Aspekten. Zum einen ist die Erweiterungsbibliothek vollständig in die bestehende Objektstruktur integriert worden. Dieser Ansatz stellt sicher, dass, angelehnt an das objektorientierte Modellkonzept, auf sämtliche gekapselte Funktion innerhalb der spezialisierten Bausteine strukturiert zugegriffen werden kann. So ist es möglich, jedes Element ob Maschine, Aggregat oder Transportsystem innerhalb der definierten Systemgrenzen abzubilden. Der zweite Aspekt behandelt die Abbildung der Energie- und Medienverbräuche in Verbindung mit den Materialflusszuständen. Zum Zeitpunkt der Entwicklung bestand keine Möglichkeit innerhalb von Plant Simulation auf bereits vorgegebene Strukturen für die Abbildung für Verbrauchswerte zurückzugreifen. Analog zur bestehenden Bibliothek ist deshalb wieder ein anwendungsspezifischer Ansatz verfolgt worden. Dieser ist möglichst abstrakt gestaltet und bietet einen eher generischen Ansatz, der es ermöglicht beliebige Stoffströme bzw. Stoffverbräuche unabhängig vom physikalischen Medium zu modellieren. Umgesetzt wurde dies mit Hilfe von Zustandsmodellen, welche mit der implementierten Steuerungsstruktur das Verbindungselement zwischen Materialfluss und Verbräuchen darstellen. Mit dieser Struktur können entweder sehr detailliert Verbräuche abgebildet werden, abhängig vom entsprechenden Zustandsverhalten oder es lässt sich mit Hilfe von mittleren Verbrauchswerten eine ausreichend flexible und schnelle Modellierung durchführen.

4.4 Verifikation und Validierung

Den bekannten Techniken sowie Vorgehensmodellen für Verifikation und Validierung (V&V) folgend (Rabe et al. 2008), wurde versucht, die V&V während des ganzen Simulationsprojekts entwicklungsbegleitend einzusetzen, um die jeweiligen Phasenergebnisse zu bewerten. In den frühen Phasen war z. B. das strukturierte Durchgehen eine praktikable Lösung, um Erkenntnisse über die Machbarkeit, Vollständigkeit und Konsistenz zu gewinnen. Nach den positiven Testergebnissen innerhalb der vereinbarten Standards und der gezogenen Systemgrenze, bildete der Vergleich mit aufgezeichneten Daten einen Schwerpunkt bei der V&V des ausführbaren Modellprototypen (Abb. 3).

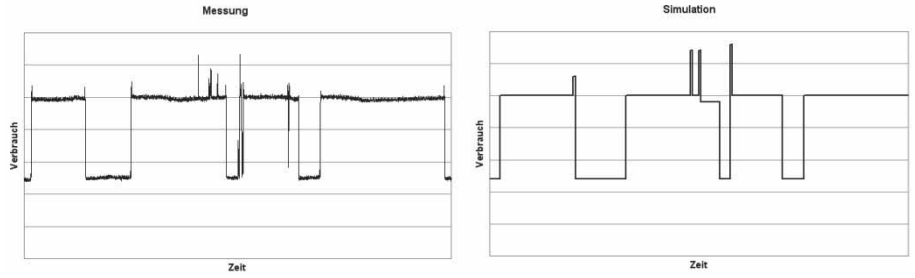


Abbildung 3: *Gemessener und simulierter Verlauf des Verbrauchs von Druckluft einer Maschine in Abhängigkeit der Betriebszustände*

In der Arbeit von Feige (2012) wurde dies exemplarisch anhand der Bedarfe von elektrischer Energie und Druckluft durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass für das gewählte Untersuchungsobjekt die geforderte Genauigkeit und Plausibilität gegeben war und sowohl Verbrauchsniveau als auch spezifischer Verlauf aufgrund der Materialflusszustände eine gute Approximation zur Realität aufwiesen.

4.5 Anwendung

Für die Anwendung zeichnen sich zwei umfassende Einsatzgebiete mit jeweils eigenständigen Fragestellungen ab. Zum einen steht die erweiterte Analyse bezüglich Energie- und Medienverbräuchen während der Auslegungsphase im Blickpunkt. Hierbei kann mit Hilfe eines Simulationsmodells eine, ergänzend zur klassischen Berechnung, erweiterte Analyse bezüglich der Verbräuche bei Maschinen in der Anlage gemacht werden. Der Nutzen der Anwendung liegt, bezogen auf den zeitlichen Ablauf, in der feineren Betrachtungsweise. Zeitdynamische Effekte finden Berücksichtigung und es können so Gleichzeitigkeiten sowie Überlagerungen transparent gemacht werden können. Es zeigt sich aber, dass durch den Einsatz analytischer Methoden sowie durch das jahrelange Erfahrungswissen in diesem Gebiet bereits in hohem Maße eine adäquate Auslegung ohne Überdimensionierung der notwendigen Infrastruktur stattfindet.

Der zweite, vielschichtigere Anwendungsfall beschäftigt sich mit den Einflüssen der materialflusstechnisch geprägten Maschinen- und Anlagensteuerung auf die Energie- und Medienverbräuche. Unabhängig ob bei Neuplanung oder bestehender Anlage ist es möglich, für Teilbereiche oder für die gesamte Anlage die relevanten Steuerungsstrukturen unter dem Gesichtspunkt der Verbrauchsanalyse abzubilden. Dabei rückt neben der Analyse nun auch die Optimierung in den Blickpunkt. Unterschiedliche Steuerungsszenarien lassen sich anhand realer Vorbilder oder theoretischer Konzepte modellieren und testen, um so die wichtigsten Einflussgrößen zu identifizieren. Auf diese Weise können Betriebsszenarien in einer Anlage beschrieben werden, die einerseits zu einem harmonischen Produktionsverlauf und Materialfluss führen und anderseits verbesserte Bedingungen beim Energie- und Medienverbrauch hervorbringen, die zu einer Reduktion der Verbräuche führen. Der Nutzen liegt hier vor allem in der Möglichkeit transparent sich beeinflussende Leistungskennzahlen und ressourcenorientierte Kennzahlen gegenüberzustellen und so den optimalen Betriebspunkt zu identifizieren, bei dem ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Produktions- und Ressourceneffizienz hergestellt ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten ereignisdiskreten Simulationslösung können Abfüll- und Verpackungsanlagen mit ihrem quasikontinuierlichen Materialfluss realitätsnah abgebildet werden. Der Nutzen der Simulationslösung liegt zum einen in der Möglichkeit äußerst schnell und flexibel bekannte Anlagenstrukturen mit Hilfe von Standardmodellen zu bewerten und einem erweiterten Kreis von Anwendern den Zugang zu ermöglichen, indem ein von der Simulation losgelöstes Software-Frontend zur Bedienung entwickelt wurde. Zum anderen ist die detailreiche Abbildung von Steuerungsphilosophien mit der Einbindung realer Betriebsdaten möglich, die eine weitreichende Betriebsanalyse und Optimierung neuer als auch bestehender Anlagen zulässt. Darauf aufbauend wird ausgehend von den Grundsätzen der

Ressourceneffizienz ein Lösungsansatz diskutiert, der es ermöglicht, Energie- und Medienverbräuche in materialflusstechnisch geprägten Simulationsmodellen abzubilden. Exemplarische Anwendungsfälle illustrieren auch hier die Einsatzmöglichkeiten. Zukünftige Aufgabenfelder sind aus Sicht der Simulation die Implementierung erweiterter Analyse- und Reportfunktionen sowie die Durchführung weiterer Simulationsexperimente für verschiedene Anlagentypen in unterschiedlichen Leistungsbereichen.

Literatur

Altiok, T.; Melamed, B.: Simulation modeling and analysis with Arena. Amsterdam, Boston: Academic Press 2007.

Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M.: Discrete-event system simulation. Upper Saddle River, Singapore: Prentice Hall 2010.

Bernhard, J.; Kahe, T.: Simulation und Modellmanagement in der Getränkeindustrie. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008.

DIN 8782. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth 1984.

Eley, M.: Simulation in der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.

Feige, A.: Entwurf und Implementierung eines Prototypen zur Auswertung von Energie- und Medienverbräuchen in Abfüllanlagen innerhalb eines Materialflussmodells in Plant Simulation. Bachelorarbeit Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 2013.

Franke, S.; Nophut, C.; Voigt, T.; Langowski, H. C.; Raab, F.; Ruß, W.; Petermeier, H.: Production Process simulation for schedule based energy optimization in the food industries. In: Cadavez, V.; Thiel, D. (Hrsg.): FOODSIM 2010. Braganca (Portugal), 24.-26. June 2010, S. 239.

Günthner, W.A.; Kadachi, M.: Simulationsgestützte Planung und Nutzung von Getränke-Abfüllanlagen. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 12265-N, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss und Logistik, Technische Universität München, 2001.

Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: Kassel University Press 2007.

Osterroth, I.: Zustandsbezogene Stromverbrauchsanalyse im Simulationsmodell. Flaschenkellerseminar 2012, Technische Universität München, 2012.

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

Rädler, T.: Modellierung und Simulation von Abfüllinien. Düsseldorf: VDI 1999.

Schult, A.: Newsletter AVV 2/2011. http://www.avv.fraunhofer.de/newsletter/02-2011/AVV-Newsletter-02-2011.html#P2 2011, Stand: 15.03.2013.

Voigt, T.: Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen. Düsseldorf: VDI 2004.

Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin: Springer 2008.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Entwicklung und Analyse einer multikriteriellen Einsatzsteuerung von Staplern in einem manuell bedienten Distributionslager

Development and analysis of a multi-attribute forklift fleet control in a manually operated distribution warehouse

Uwe Clausen, Peiman Dabidian, Daniel Diekmann, Ina Goedicke, Moritz Pöting,
TU Dortmund - Institut für Transportlogistik, Dortmund (Germany),
clausen@itl.tu-dortmund.de, dabidian@itl.tu-dortmund.de,
diekmann@itl.tu-dortmund.de, goedicke@itl.tu-dortmund.de,
poeting@itl.tu-dortmund.de

Abstract: Due to strong market competition, operators of production and logistics systems are constantly looking for measures to increase the efficiency of internal handling and storage processes. The content of this application-oriented paper is a manually operated distribution warehouse with a capacity of more than 40.000 pallets connected to an order-picking and a value-added-service area. A detailed simulation of internal material flows in this warehouse enables the testing of intelligent multi-attribute dispatching strategies for forklift fleet control. These strategies intend to minimize the empty travel time of forklifts under consideration of practical restriction such as cut off times and buffer capacities. The results of this application-oriented study show that the concept is applicable on real systems and can increase efficiency of warehouse operations. It is demonstrated that empty travel time is reduced significantly and a higher flexibility in capacity adjustment can be reached.

1 Motivation und Hintergrund

Aufgrund des starken Wettbewerbsdrucks sind Betreiber von Logistikanlagen ständig auf der Suche nach Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz von innerbetrieblichen Umschlag- und Lagerprozessen. Der vorliegende Anwendungsbeitrags beschreibt die Entwicklung und Analyse einer multikriteriellen Einsatzsteuerung von Staplern in einem manuell bedienten Distributionslager. Dieses verfügt über eine Lagerkapazität von ca. 40.000 Vollpaletten mit angeschlossenem Kommissionier- und Value-Added-Service-Bereich. Die bisherige Arbeitsweise des Systems, welche typisch für manuell bediente Lager dieser Art ist, sieht getrennte Wareneingangs- und Warenausgangsteams vor. Die

Transportaufträge werden nach dem First-Come-First-Serve eingelagert bzw. nach einer gemäß den Abfahrtzeiten vorgegebenen Auslagerreihenfolge abgefertigt (Scheid 2001; Helle 2011). Durch die Installation eines Staplerleitsystems mit einer intelligenten, teamübergreifenden Auftragsvergabe erhofft sich der Betreiber der Anlage Effizienzsteigerungen, deren Potential aufgrund der Größe des Lagers (täglich ca. 3.000 Transportbewegungen) und der Komplexität der Prozesse mit ihren Wechselwirkungen (z.B. Staueffekten) schwer abzuschätzen ist. Für eine entsprechende Analyse sind daher das Distributionslager sowie dessen Lagerverwaltungssystem und Staplersteuerungen in ein ereignisorientiertes Simulationsmodell überführt worden.

2 Systembeschreibung

Das untersuchte Lager ist ein überregionales Distributionslager mit Palettenregalen in parallel angeordneten Lagerreihen. Die Lagerfläche erstreckt sich über mehrere aneinander liegende Hallen und verfügt über einen durchgehenden Mittelgang. Für die Lagerartikel findet eine Zonenteilung sowohl über Gewichts- und Artikelklassen, als auch über Gefahrgutmerkmale statt. Darüber hinaus gibt es eine Value-Added-Service-Zone, in denen kundenindividuell Aktionsware hergestellt wird. Das Lager erstreckt sich über eine Gesamtfläche von ca. 30.000 m² mit einer zusätzlichen Value-Added-Service-Fläche von ca. 5.000 m² und ist in Abbildung 1 mit den Hauptverkehrsströmen dargestellt.

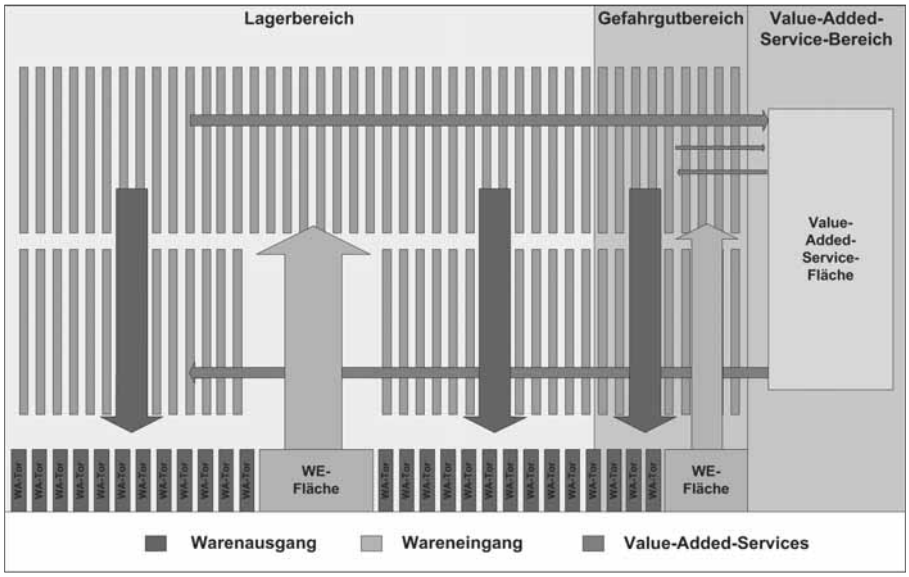


Abbildung 1: *Layout und schematischer Warenfluss der Anlage*

Die Transportauftragsvergabe wird von einer zentralen Einsatzsteuerung durchgeführt und über mobile Terminals an die Fahrer übermittelt. Die Übernahme eingehender Güter erfolgt mit Ausnahme der Gefahrgutartikel über eine zentrale Wareneingangsfläche. Für Gefahrgutartikel steht eine separate Eingangsfläche

innerhalb des Gefahrgutbereiches zur Verfügung. Ausgehende Ware wird von den Staplern aus dem Palettenregallager ausgelagert und an den Bereitstellflächen vor den jeweiligen Ausgangstoren bzw. im Kommissionierbereich bereitgestellt. Abhängig von der Tageszeit und Schichtplanung sind bis zu 15 Stapler gleichzeitig im Einsatz, aufgeteilt auf 3 autonome Teams: Wareneingangs-, Warenausgangs- und Value-Added-Service-Team.

3 Theoretische Grundlagen

Eine Einsatzsteuerung steuert die Zuordnung von Transportaufträgen und Staplern. Grundsätzlich lassen sich Steuerungssysteme in dezentrale und zentrale Systeme unterscheiden. Bei dezentralen Steuerungssystemen werden Steuerungsentscheidungen verteilt und auf Basis lokaler Informationen getroffen. Dieses bietet Vorteile in Hinblick auf praktische Anwendbarkeit und Reaktionsfähigkeit insbesondere bei der Steuerung komplexer Systeme mit kurzen Antwort- bzw. Entscheidungsintervallen (Günther et al. 2001; Fay 2008). Zentrale Steuerungssysteme hingegen besitzen den Vorteil, dass sie durch die Verfügbarkeit aller entscheidungsrelevanten Informationen zu einem globalen Optimum führen können (Scholl et al. 2005).

Um die Zuordnung von Transportaufträgen und Staplern zu steuern, existieren sowohl ein- als auch multikriterelle Dispositionsstrategien. Diese haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des logistischen Systems, wie die Arbeiten von Koo und Jang sowie Clausen für den Anwendungsfall eines AGV-Systems bzw. einer Stückgutspeditionsanlagen zeigen (Koo und Jang 2002; Clausen et al. 2011).

Einkriterielle Dispositionsstrategien lassen sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, gemäß ihrer Zielstellung in entfernungsbasierte, auslastungsbasierte und zeitbasierte Dispositionsregeln gruppieren (Le-Anh und De Koster 2006). Entfernungsbasierte Strategien, wie z.B. STTF (Shortest-Travel-Distance-First) oder NVF (Nearest-Vehicle-First), verfolgen das Ziel, den nächsten Transporter bzw. den am nächsten gelegenen Auftrag auszuwählen und die Leerfahrten zu minimieren. Diese Strategien verbessern die Performance der Transportflotte, führen allerdings auch zu sehr langen Wartezeiten von Transportaufträgen, die aufgrund ihrer ungünstigen Lage im Layout selten angefahren werden (De Koster et al. 2004). Auslastungsbasierte Strategie, wie z.B. MOQS (Maximum-Outgoing-Queue-Size) überprüfen die Pufferzustände der Quellen und Senken der Transportaufträge. Sie verfolgen das Ziel ein Überlaufen und somit Blockaden in vor- oder nachgelagerten Prozessen zu verhindern. Zeitbasierte Strategien, wie z.B. FCFS (First-Come-First-Serve) zielen auf die rechtzeitige Abarbeitung von Aufträgen ab und nutzen Ankunftszeiten bzw. auch Abfahrtzeiten (CutOffs) von Aufträgen als Entscheidungskriterium. Egbelu und Tanchoco führen neben der Basisstrategie FCFS auch Modifikationen in Bezug auf das Abrufverhalten ein. So verbietet die MFCFS-Regel das Erstellen mehrerer Transportaufträge einer Quelle. Dahinter steht die Überlegung, dass Transportfahrzeuge mit größeren Kapazitäten mehrere Aufträge auf einer Fahrt übernehmen können. Nur wenn die Auslastung der Aufträge einer Quelle die Kapazität übersteigt, kann ein weiteres Transportfahrzeug gerufen werden (Egbelu 1984).

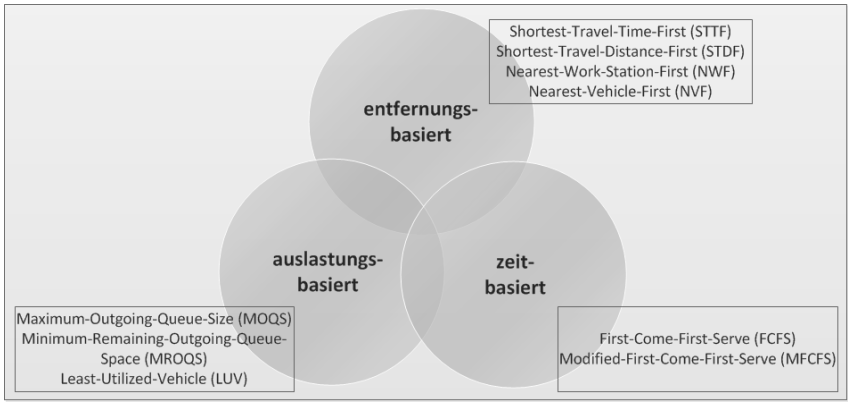


Abbildung 2: *Einkriterielle Dispositionsstrategien einer Einsatzsteuerung*

Da einkriterielle Dispositionsregeln im realen Betrieb häufig nicht alle Zielausrichtungen hinreichend erfüllen können, müssen diese zu multikriteriellen Strategien zusammengesetzt werden. Dabei bedarf es neben der Auswahl geeigneter einkriteriellen Strategien vor allem einer zweckmäßigen Methode zur Kombination einzelner einkriterieller Regeln. Vier grundsätzliche Verknüpfungsmöglichkeiten, z.B. in Form einer additiven Gewichtungen oder auch Zugehörigkeitsfunktionen, werden von Klein und Kim für Fahrerlose Transportsystem vorgestellt und deren positive Eigenschaften in Hinblick auf die Zielerreichung in anschließenden Simulationsläufen nachgewiesen (Klein und Kim 1996). Ein weiteres Anwendungsbeispiel einer kombinierten Strategie beschreibt Lampe. Für eine Kransteuerung in Terminals des Kombinierten Verkehrs wird dabei eine Prioritätskennzahl entwickelt, die mithilfe von binären, multiplen Priorisierungsparametern und Ausschlusskriterien konträre Einzelzielsetzungen, z.B. in Form von möglichst geringen Entfernungen oder der Einhaltung der Abfahrtszeiten, bestmöglich verknüpft (Lampe 2006).

4 Modellierung

Zur Analyse von Auswirkungen strategischer und operativer Entscheidungen hat das Institut für Transportlogistik eine Transportlogistikumgebung entwickelt. Basierend auf der Simulationssoftware Enterprise Dynamics ermöglicht das Tool ED Transport die Darstellung und Simulation von Material- und Informationsflüssen in logistischen Knoten des Güterverkehrs. Dabei erfolgt die Modellierung der Systemlayouts, Prozesse, Ressourcen und Systemlast auf einer mikroskopischen Ebene. Darüber hinaus können realitätsgetreue Steuerungsstrategien ausgewählt, parametrisiert und angepasst werden. (Deymann und Neumann 2008; Clausen et al. 2012)

Für die Modellierung eines Systems werden allgemein drei Datentypen benötigt: Technische Daten, Organisationsdaten und Systemlastdaten (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2010). Zu Beginn der Simulationsstudie wurden alle diese Daten aus detaillierten Informationen, welche über das reale System verfügbar waren, gewonnen und entsprechend in ein Modell überführt. Das Lagerlayout wurde maßstabgetreu mit Hilfe der Lagerbausteine der Simulationssoftware modelliert.

Dabei wurden die Regale unter Betrachtung der individuellen Regalebenen und -höhen, und deren Eignung für die Lagerung der einfachen und doppelstöckigen Palletten abgebildet. Die Pufferflächen für den Wareneingang, den Warenausgang sowie für die Kommissionierbereiche dienen als Systemgrenzen und somit als Quellen und Senken für die umgeschlagenen Paletten. Jede Palette wird dabei durch ein einzelnes Objekt modelliert. Sie können einfach oder doppelstöckig gehandhabt werden und haben zusätzlich Artikeltyp, Größe, Gewicht und Mindesthaltbarkeitsdatum der Waren als Attribute. Die Modellierung der entsprechenden Systemlastdaten erfolgte auf Basis der realen Auftragsdaten aus dem betrachteten Lager für eine typische Woche. Dazu ist sowohl die Abbildung des Lagerbestands zu Beginn der betrachteten Woche als auch die Berücksichtigung der abgewickelten Menge eingehender und ausgehender Paletten im Zeitverlauf vorgenommen worden, da beide Faktoren das Fahrverhalten und die Leistung des Systems bestimmen. Die Implementierung der Strategien zur Auswahl eines Lagerplatzes für eingehende Platten sowie die Auslagerstrategie zur Auswahl einer ausgehenden Palette erfolgte auf Basis der Logik der Lagerverwaltungssoftware (Zonung, ABC-Klassifizierung) des realen Systems. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt des Simulationsmodells als 3D-Screenshot.

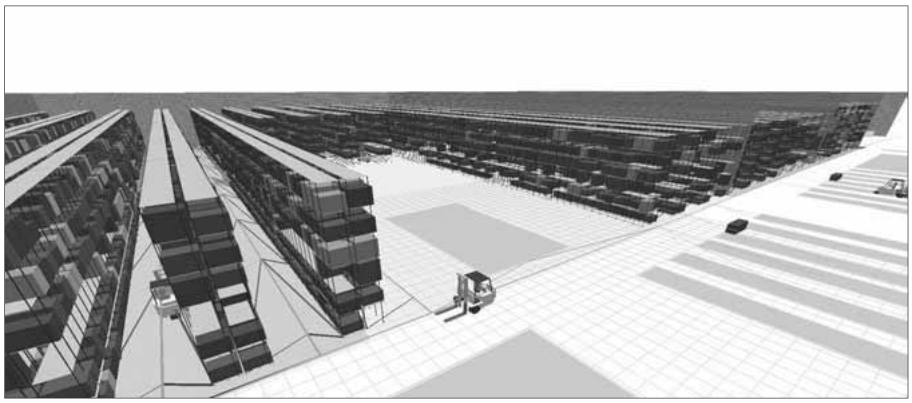


Abbildung 3: *3D-Screenshot Simulationsmodell*

Für die entsprechend notwendigen Bewegungen der Gabelstapler werden die Transportwege mit Hilfe eines bidirektionalen Netzwerks auf Grundlage der tatsächlichen Wegstrecken abgebildet. Jeder Stapler hat eine Kapazität von einer einfachen oder einer doppelstöckigen Palette, die Wegfindung im Netzwerk erfolgt über einen Dijkstra Algorithmus, der die kürzeste Wegstrecke berechnet. Die relevanten Prozesszeiten für die Bearbeitung der Transportaufträge werden auf der Grundlage einer umfangreichen Studie des Unternehmens selbst bestimmt. Dabei wurde zwischen den Hub- und Senkzeiten sowie den Be- und Entladezeiten unterschieden. Es ist eine spezielle Netzwerkkonfiguration gewählt worden, um das Problem der Blockade der Gabelstapler untereinander in einem Gang während einer Ein- oder Auslagerung berücksichtigen zu können. Die Regalgassen sind dazu in gleichgroße Abschnitte unterteilt worden, welche mit der Größe der Lagermodule übereinstimmen. Über die Ereignisse der Ein- und Auslagervorgänge werden die

Sperrung und Freigabe des betroffenen Streckenabschnitts vorgenommen. Somit es ist möglich, die spezifischen Abschnitte in einem Gang beim Ein- oder Auslagern einer Palette in/aus einem Lagermodul zu realisieren. Im Modell wurde zwischen zwei verschiedenen Streckenabschnitten unterschieden. Die Streckenabschnitte in den Hauptgängen und bei den Warenein- und -ausgangsflächen sind aufgrund der ausreichenden Gangbreite immer offen, da diese von mehreren Gabelstaplern nebeneinander befahren werden können. Die Gassen zwischen den Regalen werden aufgrund der schmaleren Gangbereite abschnittsweise wie beschrieben gesperrt. Zur angemessenen Abbildung der Umschlagkapazität ist der reale Schichtplan der Gabelstaplerflotte in das Modell integriert worden. Die Gabelstapler werden dabei einem der drei Teams zugewiesen: Dem Wareneingangsteam für die Einlagerung der eingehende Ware ins Lager, dem Warenausgangsteam zur Auslagerung der ausgehenden Ware in die Ziel-Pufferbereiche und den Kommissionierbereich sowie das Value-Added-Service-Team zur Ver- und Entsorgung des Value-Added-Service-Bereichs.

Basierend auf den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2 wurde eine multikriterielle Prioritätskennzahl entwickelt, die für die zentrale Einsatzsteuerung von Staplern mehrerer Teams geeignet ist. Diese dynamische Kennzahl basiert auf vier unterschiedlichen Levels, welche in Abbildung 4 visualisiert sind und im Folgenden näher erläutert werden:

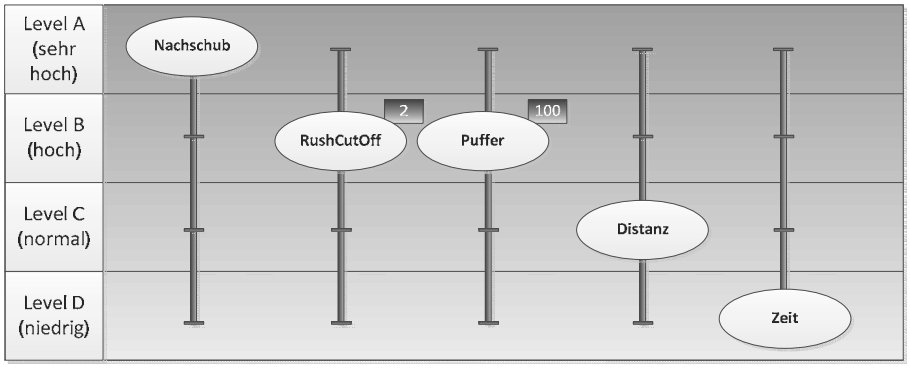


Abbildung 4: *Level der multikriteriellen Einsatzsteuerung*

Level A: Zu dem höchsten Level gehören alle Transportaufträge, die als Nachschubaufträge auf Kommissionierplätze gefahren werden. Um die Kommissionierung nicht zu beeinträchtigen, besitzen diese Aufträge immer die höchste Priorität. Bei mehreren Nachschubaufträgen im System entscheiden die Kriterien der Level B, C bzw. D, welcher Auftrag als nächstes gefahren wird.

Level B: Hierzu gehören Transportaufträge, die entweder aufgrund von zeit- oder auslastungsbasierten Kriterien priorisiert abgefahren werden müssen. Da alle Warenausgangsaufträge fest vorgegebene CutOffs für die Abfertigung besitzen, müssen diese priorisiert abgefertigt werden, sobald die rechtzeitige Bereitstellung der Paletten auf den Warenausgangsflächen gefährdet ist. Durch Abgleich der Systemlast und der Prozessparameter wurden 2 Stunden vor CutOff als Grenze definiert. Unterschreitet ein Auftrag während des Simulationslaufs diese Grenze

wird er als Level B eingestuft. Dies gilt auch für Aufträge der Wareneingangsfläche, sobald eine Kapazität von 100 Paletten erreicht ist, da sonst die Abfertigung von eingehenden Fahrzeugen behindert wird. Sind mehrere Aufträge zur gleichen Simulationslaufzeit auf dem Level B, werden die Aufträge höher priorisiert, die bereits länger das Level B erreicht haben bzw. stärker die definierte Kapazitätsgrenzen der Puffer überschreiten.

Level C: Befinden sich keine Aufträge vom Level A oder B im System wird zuerst der Auftrag mit der kürzesten Entfernung (Short-Travel-Distance-First) abgefahren um Leerfahrten zu reduzieren.

Level D: Bei Aufträgen, die identische Entfernungen zur Position des freiwerdenden Staplers aufweisen, definiert die FCFS (First-Come-First-Serve) Regel den nächsten Auftrag. Dies geschieht beispielsweise wenn mehrere Paletten in der Wareneingangsfläche abzufertigen sind.

5 Simulationsexperimente und Ergebnisse

Für den detaillierten Vergleich verschiedener Szenarien in der Simulationsstudie ist eine entsprechend differenzierte Auswertemöglichkeit der Transportleistung geschaffen worden. Die Messung der Systemleistung erfolgt dabei nach den Prozesszeitanteilen eines Auftragsdurchlaufes. Nach der Zuordnung eines Staplers zu einem Auftrag muss dieser zunächst eine *Leerfahrt* zum Auftragsquellort durchführen. Während dieser Zeit kann er durch andere Stapler blockiert sein, diese Zeit wird entsprechend separat ausgewiesen (*Blockingzeit*). Bei Auslageraufträgen muss dann eine *Hubzeit* erfolgen, bevor eine Palette aufgenommen werden kann. Im Anschluss an diese *Lastaufnahmezeit* muss dann auch die *Senkzeit* berücksichtigt werden. Im Falle von Einlageraufträgen entfällt die Hub- und Senkzeit bei der Lastaufnahme, da die Paletten vom Boden aufgenommen werden. Anschließend erfolgt die *Lastfahrt* des Staplers zum Zielort des Auftrags, während der ebenfalls eine Blockingzeit entstehen kann. Je nach Höhe des zugewiesenen Lagerplatzes muss bei Einlageraufträgen dann eine Hubzeit und nach Durchführung der Lastabgabe eine Senkzeit berücksichtigt werden. Nach abgeschlossenem Prozesszyklus bekommt der Stapler über mobile Terminals einen neuen Auftrag zugewiesen. Befinden sich keine wartenden Aufträge im System entsteht eine *Wartezeit*, bis neue Aufträge eingelastet werden.

Das entwickelte Modell ist zunächst auf Grundlage der Studie, die das Unternehmen zur Untersuchung der Prozesszeiten durchgeführt hat, erfolgreich validiert worden. Die aus der Studie bekannten durchschnittlichen Prozesszeiten für die verschiedenen Prozessabschnitte einer Auftragsdurchführung sind dabei den Ergebnissen der Simulation differenziert nach den verschiedenen Teams gegenübergestellt worden. Zusätzlich wurden die in der Prozessuntersuchung des Unternehmens genutzten Referenzstrecken für die Beurteilung der Last- und Leerfahrtanteile mit den entsprechenden Transportzeiten im Modell verglichen. Die Ergebnisse belegten, dass das entwickelte Simulationsmodell alle Teams des realen Systems richtig repräsentiert und für weitere Studien zur Verbesserung der Systemleistung genutzt werden kann.

Für das anschließend durchgeführte Szenario zur Untersuchung der neuen Einsatzsteuerung wurde die in Kapitel 4 dargestellte, multikriterielle

Einsatzsteuerung implementiert. Die neue Steuerung fasst alle Stapler des vorherigen Wareneingangs- und Warenausgangsteams zu einem neuen Team zusammen und ermöglicht eine Zuweisung aller Ein-, Aus- sowie Nachschubaufträge zu allen Staplern. Ausgenommen von dieser teamübergreifenden Vergabe ist die Ver- und Entsorgung des Value-Added-Service-Bereichs. Da dieser durch ein Drittunternehmen betrieben wird, waren zum Projektzeitpunkt noch nicht die prozessmäßigen und datenseitigen Schnittstellen einer Integration gegeben.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, erfolgte die Gegenüberstellung der Ergebnisse der neuen Einsatzsteuerung mit den Ergebnissen des Validierungsszenarios. Die Anzahl und Schichtplanung der eingesetzten Stapler blieb dabei in beiden Szenarien gleich. Abbildung 5 zeigt den Vergleich der durchschnittlichen Prozesszeitanteile je Auftragszyklus.

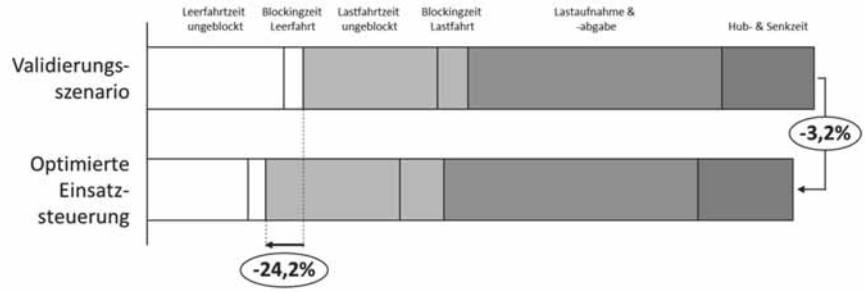


Abbildung 5: *Vergleich der durchschnittlichen Ausführungszeit eines Transportauftrags für das Validierungsszenario und die optimierte Einsatzsteuerung*

Es zeigt sich, dass die Nutzung der neuen Einsatzsteuerung eine deutliche Einsparung der Leerfahrtzeit von 24,2% bewirkt, da kürzere Anschlussstrecken zwischen den Auftragsquellorten ermöglicht werden. Jedoch erfolgt eine leichte Erhöhung des durchschnittlichen Zeitanteils der geblockten Lastfahrt. Diese entsteht aufgrund der insgesamt größeren Staplerflotte, welche dann vor allem bei der Einlastung einer großen Menge an Einlageraufträgen von Paletten mit ähnlichen Eigenschaften die Wahrscheinlichkeit von Staueffekten in den betroffenen Lagergassen erhöht. Alle weiteren Zeitanteile der Auftragsdurchführung werden durch die angepasste Einsatzsteuerung nicht beeinflusst und bleiben daher gleich. Insgesamt ergibt sich in diesem Szenario somit ein direktes Einsparpotential von 3,2% der durchschnittlichen Auftragsausführungszeit.

Indirekt ergeben sich jedoch zusätzliche Potentiale zur Effizienzsteigerung des Betriebs. Ersichtlich wird dies bei der Betrachtung des Bestands an wartenden Transportaufträgen im Zeitverlauf, wie er jeweils für die beiden Szenarien in Abbildung 6 dargestellt ist.

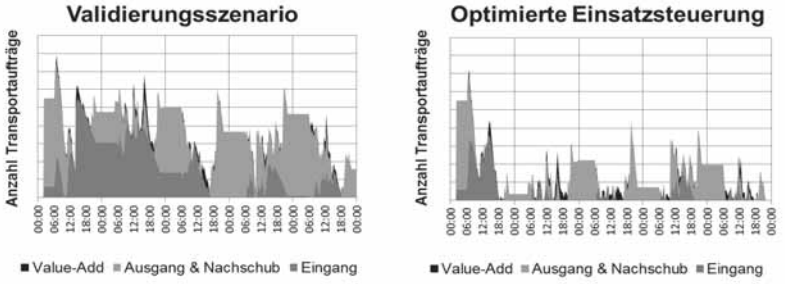


Abbildung 6: *Entwicklung des Auftragsbestands über die Zeit für das Validierungsszenario und das Szenario mit optimierter Einsatzsteuerung im Vergleich*

Aufgrund der deutlich erhöhten Flexibilität in der Steuerung, die sich durch die Konsolidierung der Staplerteams für Warenein- und -ausgang ergibt, werden die verfügbaren Aufträge schneller bearbeitet. So ist es im Rahmen der operativen Betriebssteuerung möglich, die Staplerkapazität besser dem tatsächlichen Auftragsbestand anzupassen.

Ferner zeigte sich bei der Auswertung der RushCutOffs, dass das gewählte Intervall von zwei Stunden erfolgreich zur Einhaltung der geforderten Servicekriterien beiträgt. Etwa 2% der Aufträge wurden zum Zeitpunkt der Vergabe als Level B mit einem RushCutOff bewertet. Von diesen Aufträgen erhielten jedoch nur ca. 25% den RushCutOff auf Basis der nachteiligen Position des Auftragsquellorts im Layout. In allen anderen Fällen war die Vergabe der Priorisierung durch den Zeitpunkt der Auftragseinlastung begründet, welcher sehr nah oder bereits nach der definierten CutOff-Zeit des Warenausgangsauftrags lag. Die Auswertung der Überprüfung der Wareneingangsflächen zeigte, dass sich über die Woche kurzfristige Spitzenlasten ergeben. Diese lassen sich durch die dynamische Integration der kritischen Flächenauslastungen in die Einsatzsteuerung erfolgreich für den praktischen Anwendungsfall integrieren.

6 Fazit

Der vorliegende Beitrag zeigt die erfolgreiche Entwicklung und Implementierung einer multikriteriellen Einsatzsteuerung in der Simulation eines manuell bedienten Distributionslagers. Durch die überwiegend wegoptimierte Vergabe der Transportaufträge konnten Leerfahrten um circa 25% reduziert werden, was bezogen auf die gesamte Staplerflotte eine Verbesserung der durchschnittlichen Auftragsausführungszeit von 3,2% bedeutete. Ferner ermöglicht die teamübergreifende Vergabe der Transportaufträge eine flexiblere Nutzung der Staplerkapazitäten, was die operative Anpassung an die dynamischen Sendungslasten erleichtert. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher praktischer Anforderung in der Steuerungslogik mit Hilfe verschiedener Prioritätslevel konnte die Anwendbarkeit der Einsatzsteuerung im realen System gewährleistet werden.

Wesentlich war dabei die intelligente Integration der CutOff-Zeiten im Warenausgang sowie der Kapazitätsgrenzen von Pufferflächen.

Literatur

Arnold, D. (Hrsg.); Isermann, H. (Hrsg.); Kuhn, A. (Hrsg.); Tempelmeier, H. (Hrsg.); Furmans, K. (Hrsg.); Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin: Springer, 2008.

Clausen, U.; Kaffka, J.; Diekmann, D., Mest, L.: Impact of different Unloading Zone Locations in Transshipment Terminals under various Forklift Dispatching Rules. In: Jain, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference for a Sustainable World, S. 1663-1672, Phoenix, 2011.

De Koster, R.; Le-Anh, T.; Van der Meer, R.: Testing and classifying vehicle dispatching rules in three real-world settings. Journal of Operations Management 22 (2004), S. 369-386.

Egbelu, P.; Tanchoco, J.: Characterization of automated guided vehicle dispatching rules. In: International Journal of Production Research 22 (1984), Nr.3, S. 359 - 374.

Fay, A.; Jerenz, S.; Seitz, N.: Dezentrale Steuerung von Transportsystemen in Analogie zum Routing in Datennetzen. In: Automatisierungstechnik 56 (2008), S. 284-295.

Gudehus, T.: Dynamische Disposition – Strategien, Algorithmen und Werkzeuge zur optimalen Auftrags-, Bestands- und Fertigungsdisposition. 3.Auflage. Berlin: Springer, 2012.

Günther, H.-O.; Lehmann, M.; Raffel, W.-U.; Wagner, G.: Modellierung und Simulation Fahrerloser Transportsysteme als Multiagentensysteme. 4. DFG-Kolloquium SPP Agenten, Bonn: 2001.

Helle, F.: Software statt Stapler. In: LT-Manager 3 (2011), S. 70-73.

Klein, C.; Kim, J.: AGV dispatching. In: International Journal of Production Research 34 (1996), Nr. 1, S. 95-110.

Koo, P.-H.; Jang, J.: Vehicle Travel Time Models for AGV Systems under Various Dispatching Rules. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 14 (2002), Nr. 3, S.249-261.

Lampe, H.: Untersuchung von Dispositionsentscheidungen in Umschlagterminals des Kombinierten Verkehrs Schiene/Straße. Dortmund. Praxiswissen, 2006.

Le-Anh, T.; De Koster, M.B.M.: A review of design and control of automated guided vehicle systems. In: European Journal of Operational Research 171 (2006), S. 1-23.

Scheid, W.-M.: Optimierung manueller Transporte: Theoretische Überlegungen zu Stapler-Leitsystemen. In: Fördertechnik: Zeitschrift für Logistik, Materialfluss, Transport- und Lagertechnik 70 (2001), Nr. 9, S. 22-24.

Scholl, K.-U.; Klein, M.; Gaßmann, B.: Zentrale Aufgabenverteilung in einem fahrerlosen Transportsystem. In: 19. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme (2005), S. 253-259.

VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Düsseldorf: VDI 2010.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Selbststeuernde Logistik im Umlaufmanagement von Verleihartikeln

Autonomously controlled logistics for rental articles

Florian Harjes, BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen, Bremen (Germany), haj@biba.uni-bremen.de

Bernd Scholz-Reiter, Universität Bremen, Bremen (Germany), bsr@uni-bremen.de

Abstract: The disposition of rental articles within logistic systems generally takes place between the poles of conflicting objectives, such as the adherence to due dates, flexibility, article quality, technical reliability or cost effectiveness. Correspondingly, the related order management defines a complex and dynamic task. This contribution introduces the concept, the implementation as well as the first test results of an autonomously controlled disposition system for rental articles based on software agents. At this, the paper describes the design of the target process, the modelling of the overall system and first experimental results. Thereby, a company from the field of event logistics serves as a use case.

1 Einführung

Das Umlaufmanagement von Verleihartikeln ist in der Regel mit einer dynamischen Auftragsdisposition und -steuerung verknüpft (Huth und Mattfeld 2008). Die zugehörigen Logistikprozesse bewegen sich im Spannungsfeld inhärenter Zielkonflikte hinsichtlich der Termintreue, der Flexibilität, des Preis/Leistung-Verhältnisses, der Artikelqualität sowie ihrer technischen Zuverlässigkeit. Die betriebswirtschaftliche Umsetzung erfolgt in der Bestrebung, die Auslastung von Transportmitteln (z.B. Lkw, Kleintransporter, Lieferwagen) sowie die Nutzungsrate von Verleihartikeln zu maximieren und die Anzahl der Fahrten, die Länge der Transportwege sowie den Umfang des Handhabungsaufwandes zu minimieren (Harjes und Scholz-Reiter 2012). Dies induziert Zielkonflikte, da eine Fahrtenreduktion Mobilitätseinschränkungen der Verleihartikel bzw., vice versa, eine hohe Nutzungsrate der Verleihartikel unter Umständen volumenreduzierte und damit in ihrer Effizienz verminderte Transporte bewirken würde. Erschwerend kommen Umweltdynamiken hinzu, die aus Auftragsmodifikationen, technischen Ausfällen und Verspätungen resultieren. Sie verhindern die Realisierung einer zuvor erfolgten Ressourcenallokation und bedingen daher eine flexible Planung bzw. reaktive Steuerung (Harjes und Scholz-Reiter 2012).

Das Prinzip der Selbststeuerung stellt ein potentielles Steuerungsparadigma für diese Situation dar. Unter Selbststeuerung wird in diesem Zusammenhang die dezentrale Entscheidungsfindung autonomer logistischer Objekte in heterarchischen Strukturen zum Ziel einer höheren Robustheit und positiven Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte und flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität verstanden (Windt und Hülsmann 2007). Im Mittelpunkt dieses Beitrags steht das Konzept eines auf Multiagentensimulation basierenden Dispositionssystems, das das Prinzip der Selbststeuerung für Verleihartikel realisiert. Vor dem Hintergrund eines Anwendungsfalles aus dem Bereich der Veranstaltungslogistik werden die Entwicklung eines selbststeuernden Soll-Prozesses und die darauf aufbauende Modellierung des Dispositionssystems betrachtet. Weiterhin gibt der Beitrag Einblick in den derzeitigen Implementierungsstand und stellt erste Ergebnisse der Labortests vor.

2 Anwendungsfall

Das im vorliegenden Beitrag betrachtete Dispositionssystem orientiert sich an der Ist-Situation eines KMU aus der Veranstaltungsbranche. Die Ausgangssituation stellt sich hierbei wie folgt dar. Die relevanten logistischen Vorgänge finden derzeit ausschließlich an einem Standort, dem Zentrallager des Unternehmens statt. Die Zentraldisposition führt speziell bei Auftreten oben skizzierter Dynamiken zu einem sehr hohen Kommunikations- und Problemlösungsaufwand (Harjes und Scholz-Reiter, 2012). Ein wesentlicher zusätzlicher Problemtreiber ist in der manuellen Bestandsführung am Veranstaltungsort zu sehen. Zwar werden für die Ver- und Entladevorgänge Packlisten geführt, jedoch erfolgt eine automatische Identifikation ausschließlich am Lager. Ein- und Ausladevorgänge, die an Veranstaltungsorten stattfinden, bedürfen daher eines manuellen Abgleichs mit der für den Auftrag erstellten Packliste. Da der Auf- und Abbau am Veranstaltungsort unter großem Zeitdruck steht und sich ein Großteil der Verleihartikel gebündelt in Ladungsträgern befindet, werden die ein- und ausgehenden Materialbewegungen in das bzw. aus dem Transportmittel nur ungenügend dokumentiert.

Dieser Umstand verschärft sich durch die Beteiligung verschiedenen Personals für Auf- und Abbau. Wissen über Position und Umfang der Verleihartikel werden von der Aufbau- nicht in die Abbauphase transferiert. Als Konsequenz werden Defekte und Diebstähle erst spät erkannt. Dies führt zu Informationsasymmetrien, die dem Disponenten bei bereits disponierten, aber derzeit nicht einsatzfähigen Verleihartikeln in Zeitdruck versetzen, Ersatz zu organisieren. Ebenso tritt der Fall auf, dass Verleihgegenstände auf einer Veranstaltung nicht benötigt und wieder zurück ins Lager verbracht werden. Da ihre Verfügbarkeit erst mit Lagereingang im System verbucht wird, kann es passieren, dass für parallele oder kurz darauf beginnende Veranstaltungen unnötigerweise Fremdmaterial geliehen wird.

3 Grundlagen/Stand der Technik

Zentrales Element des Dispositionsansatzes für den oben skizzierten Anwendungsfall ist der Einsatz einer Multiagentensimulation als Steuerungsinstrument. Die zu disponierenden Ressourcen werden als Agenten mit objektindividuellen Zielfunktionen repräsentiert und realisieren in kooperativen

Verhandlungen die Ausführung der vorliegenden Aufträge. Die Ergebnisse der Simulationsläufe werden hierbei direkt als Planungsergebnisse interpretiert und umfassen sowohl Kommissionier- als auch Pack- und Ladelisten. Zusätzlich integriert der Simulationsansatz die Tourenplanung der eingesetzten Transportmittel.

Aus wissenschaftlicher Perspektive betrachtet der Beitrag entsprechend die simulative Lösung eines kombinierten Problems aus Disposition, Touren- bzw. Routenplanung und zugehöriger Steuerungsstrategie. Im Folgenden wird kurz ein Einblick in die Grundlagen der relevanten Teilprobleme und der auf sie angewandten Methoden gegeben, wobei jeweils nur die Aspekte betrachtet werden, die für den vorliegenden Beitrag von Bedeutung sind.

3.1 Abgeleitete Teilprobleme

3.1.1 Disposition

Der Begriff Disposition bezeichnet in der Regel die Zuteilung von Ressourcen in Abhängigkeit von terminlichen Restriktionen (Gudehus 2012a). Erfolgt die Zuteilung im Hinblick auf vorliegende Aufträge, handelt es sich um Auftragsdisposition. Diese hat die Erfüllung der Auftragsanforderungen unter kostenoptimaler Auslastung der verfügbaren Ressourcen zum Ziel und kann, je nach Häufigkeit und Planungshorizont in statische und dynamische Disposition unterschieden werden (Gudehus 2012b).

Im betrachteten Anwendungsfall der Veranstaltungslogistik handelt es sich um eine ereignisdynamische Disposition, d.h., die Ressourcenzuteilung wird in Abhängigkeit vom Eintreten dispositionsrelevanter Ereignisse ausgeführt. Zu diesen Ereignissen gehörten Neuaufträge, Auftragsänderungen oder Ressourcenausfälle, die eine Auftragserfüllung auf dem derzeitigen Planungsstand unmöglich machen und somit eine Neuplanung erfordern (Gudehus 2012a). Für das Umlaufmanagement von Verleihartikeln in der Veranstaltungslogistik unterliegt der Dispositionsbegriff einigen Einschränkungen. Da Verleihartikel umlaufende Gebrauchsgüter darstellen, bedingt die Auftragsdisposition in diesem Zusammenhang keine Fertigungsaufträge, so dass keine Fertigungsdisposition notwendig ist. Weiterhin findet ein Bestellmanagement nur im Zusammenhang mit Neuanschaffungen statt.

3.1.2 Touren- und Routenplanung

Die Planung von Touren ist ein häufiges Problem in Planungs- und Ablaufprozessen. Die Touren,- oder auch Transportplanung, betrachtet die Zusammenstellung von Transportaufträgen zu Touren, die eine möglichst optimale Auslastung der verfügbaren Transportmittel garantiert. Die Reihenfolge der Aufträge impliziert die zu fahrende Route und orientiert sich an der Einhaltung ökonomischer Zielvorgaben, wie beispielsweise einer minimalen Fahrstrecke oder –zeit (Rieck 2009). Die Kombination aus Touren- und Routenplanung stellt also ein Entscheidungsproblem hinsichtlich der Zusammensetzung der Ladung und des Transportweges dar (Wenger 2010). Dieses liegt, je nach Ausprägung der Rahmenbedingungen, als Traveling Salesman Problem (TSP), Vehicle Routing Problem (VRP) oder Pickup and Delivery Problem (PDP) vor (Parragh et al. 2008).

Die Veranstaltungslogistik stellt eine Mischform aus VRP und PDP dar, da zwar generell von einem Zentrallager aus operiert wird, gleichzeitig jedoch auch

auftragsspezifische Transportvorgänge zwischen den Veranstaltungsorten stattfinden können. Die Autoren sind daher geneigt, diese Problemstellung als Dynamic Multi Vehicle Pickup and Delivery Problem with Time Windows (DMVPDPTW) einzuordnen. Diese Problemklasse betrachtet, ausgehend von einem Zentrallager, mehrere Transportmittel und Zielorte, wobei der Planung Termin- und Umweltrestriktionen (Staus, etc.) zugrunde liegen (Larsen 2001).

3.2 Angewendete Methoden

Die integrierte Lösung der skizzierten Teilaspekte der Disposition im Bereich in der Veranstaltungslogistik fußt auf einer kombinierten Anwendung von Methoden aus dem Bereich der Selbststeuerung. Der Begriff Selbststeuerung bezeichnet ein Paradigma in Produktion und Logistik, welches den Transfer von Entscheidungskompetenz weg von zentralen Instanzen hin zu den betroffenen Objekten vorsieht (Windt und Hülsmann 2007). Die im Folgenden vorgestellten Methoden entstammen daher entweder vollständig der Forschung im Bereich der Selbststeuerung oder stellen Modifikationen bestehender Ansätze und deren Implementierungen dar.

3.2.1 Multiagentensimulation

Multiagentensysteme (MAS) zielen auf die Lösung von komplexen Problemen durch Kooperation einer Vielzahl einzelner Einheiten, sogenannter Softwareagenten ab (Wooldridge 2009). Diese repräsentieren Teilaspekte des betrachteten Problems und verfügen über entsprechende Eigenschaften, bestehend aus objektspezifischen Fertigkeiten, der zugehörigen Wissensbasis und individuellen Zielen.

Die Problemlösung in, bzw. mittels Multiagentensystemen vollzieht sich durch kooperative Betrachtung der abgebildeten Teilprobleme in Verhandlungen zwischen den beteiligten Agenten. Diese verfolgen hierbei unter Einsatz ihrer spezifischen Fähigkeiten und des implizierten Wissens ihre individuellen Zielfunktionen. Grundgedanke dieses Vorgehens ist die Annahme, dass eine Erfüllung der Ziele jedes einzelnen Agenten zur Lösung der mit diesen verbundenen Teilprobleme und in Summe auch des Gesamtproblems führt (Ferber et al. 2004).

Kern des vorgestellten Dispositionssystems ist die Simulationssoftware PlaSMA (Platform for Simulations with Multiple Agents) (Warden et al. 2010). Diese basiert auf der Agentenplattform JADE, betrachtet jedoch speziell die Simulation selbststeuernder logistischer Systeme (Gehrke et al. 2010).

3.2.2 Selbststeuernde Routenplanung

Die Lösung des Teilproblems der Routenplanung wird im vorgestellten Dispositionssystem auf die Agenten übertragen, die innerhalb der Simulation als Repräsentanten der Transportmittel fungieren. Die dazu notwendigen Fähigkeiten und das daraus resultierende Verhandlungsverhalten orientieren sich hierbei am Distributed Logistics Routing Protocol (DLRP). Dieses Protokoll überträgt Mechanismen des Routings von Datenpaketen durch Informationsnetzwerke auf die Wegfindung autonomer Objekte in logistischen Netzwerken (Rekersbrink 2008).

Hierbei verfolgt das DLRP fünf Grundprinzipien um ein selbständiges, reaktives Routing in komplexen und dynamisch veränderlichen Netzwerken zu ermöglichen (Rekersbrink 2009):

- *Zielaufteilung*: Entscheidungen hinsichtlich des Vorgehens zur Zielerreichung werden auf die autonomen Objekte verteilt.
- *Informationsbeschaffung*: Die Objekte beschaffen sich selbst die notwendigen Informationen zur Entscheidungsfindung.
- *Informationsbroker*: Knoten im Netzwerk dienen als Basis für den Informationsaustausch.
- *Routenanmeldung*: Gewählte Routen werden angemeldet.
- *Reaktivität*: Das Routing wird regelmäßig neu angestoßen.

3.2.3 Informationsbeschaffung

Die dezentrale Entscheidungsfindung, die dem DLRP und der PlaSMA-Simulation zugrunde liegt, stellt eine wesentliche Grundlage der Selbststeuerung dar (Windt und Hülsmann 2007). Um die dafür notwendige Informationstransparenz sicherzustellen, kommen moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) zum Einsatz. Das vorgestellte Dispositionssystem bezieht seine Informationen aus der Auftrags- und Bestandsdatenbank des Beispielunternehmens. Wie in Abschnitt 2 skizziert, decken die Bestandsdaten jedoch nur die Ladevorgänge am Zentrallager ab, alle Materialbewegungen an den Veranstaltungsorten werden entweder gar nicht oder nur lückenhaft dokumentiert.

Um die Voraussetzungen für dezentrale Entscheidungen zu schaffen, sollen die Transportfahrzeuge des Beispielunternehmens mit einem Modul zur Informationsbeschaffung ausgestattet werden. Dieses beinhaltet eine Ortungskomponente auf Basis des Global Positioning Systems (GPS), eine Komponente zur Identifikation durch RFID (Radio Frequency Identification) und zwei Bewegungsmelder zur Erkennung der Laderichtung. Weitere Bestandteile sind ein Industrie-PC zur Aufbereitung der gesammelten Daten, ein UMTS-Router (Universal Mobile Telecommunication System) für deren Übertragung und eine Stromversorgung für das Gesamtsystem. Das Modul wurde im Zuge erster Labortests prototypisch implementiert und ist so ausgeführt, dass es schnell befestigt und rückstandslos entfernt werden kann, um eine Verwendung in Mietfahrzeugen zu ermöglichen (Harjes & Scholz-Reiter, 2012).

4 Implementierung und erste Ergebnisse

4.1 Soll-Prozess

Der Implementierung des Distributionssystems liegt ein Soll-Prozess zugrunde, der die bisher von einem Experten zentral getroffenen Distributionsentscheidungen durch dezentrale Verhandlungen von Agenten in der Simulation ersetzt. Hierzu wurden alle beteiligten Ressourcen wie Artikel, Transportfahrzeuge und Personal durch entsprechende Agenten repräsentiert. Anzahl und Beschaffenheit sind hierbei den Bestandsdaten des Beispielunternehmens entnommen, die Terminrestriktionen und Positionen der Veranstaltungsorte werden aus den Auftragsdaten abgeleitet.

Die Verhandlungen zwischen den Agenten innerhalb der PlaSMA-Simulation verlaufen bidirektional, die Anfragen hinsichtlich Verfügbarkeit folgen einem Top-Down Ansatz, die Zusagen werden in Gegenrichtung (Bottom-up) erteilt. D.h., die

Artikellisten-Manager, von denen es einen pro Projekt einen gibt, verhandeln mit den gewünschten Artikeln, diese wiederrum mit ihren Komponenten, falls vorhanden, und dann mit den Transportmitteln und dem erforderlichen Personal. Die Planung einer Veranstaltung ist abgeschlossen, wenn die benötigen Artikel, Transportkapazitäten und das zugehörige Personal zugewiesen sind.

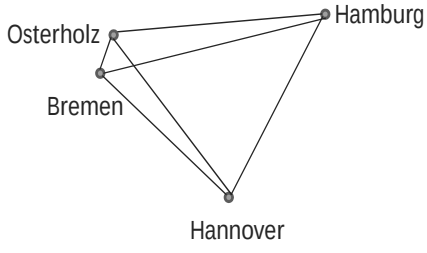
Die Tourenplanung findet in den Verhandlungen zwischen den Artikeln, und den Transportmitteln statt. Hier wird, dem DLRP folgend, aus den Rahmenbedingungen der Projekte hinsichtlich Ort, Veranstaltungsdauer sowie den notwendigen Zeitfenstern für den Auf- und Abbau eine Route generiert. Kommen neue Veranstaltungen hinzu, wird die Planung entsprechend ergänzt, wobei auch an den Veranstaltungsorten verfügbares Material berücksichtigt wird. In diesem Sinne können Veranstaltungen als temporäre Zwischenlager in einem veränderlichen Logistiknetzwerk aufgefasst werden, an denen Umladevorgänge möglich sind.

4.2 Implementierung

Der Stand der Implementierung beinhaltet die notwendigen Anpassungen der PlaSMA-Plattform an die Anforderungen einer Steuerungsmethode. D.h. es wurden Schnittstellen zu den Bestands- und Auftragsdatenbanken im ERP des Beispielunternehmens erstellt und eine grafische Benutzungsoberfläche für die Verwaltung der zu disponierenden Veranstaltung sowie die Ausgabe der erzeugten Dispositionsergebnisse erstellt. Die Plausibilität der Planungsergebnisse wurde in ersten Testszenarien nachgewiesen, deren Ergebnisse im nächsten Abschnitt erläutert werden. Die Simulationsdurchführung erfolgt auf dem momentanen Stand in mehreren iterativen Durchläufen, auf eine Veränderung der Parameter wird durch einen Neustart der Simulation reagiert. Zukünftige Implementierungen sind dahingehend ausgerichtet, dass die Änderungen dynamisch zur Laufzeit berücksichtigt werden können, die Planung also betriebsbegleitend erfolgen kann.

4.3 Erste Ergebnisse

Die ersten Testläufe dienen dazu, erste Fragen hinsichtlich der Plausibilität und Robustheit des Distributionssystems zu beantworten. Hierzu wurden vier Testszenarien definiert, die jeweils von fünf Veranstaltungen in vier Städten ausgehen. Sie erstrecken sich über insgesamt drei Tage und sollen mit maximal drei Fahrzeugen bedient werden. Dabei unterscheiden sie sich in der Anzahl der angeforderten Artikel. Das hierbei betrachtete Logistiknetz sowie die Veranstaltungsorte sind auf Abbildung 1 zu sehen.



Stadt	Veranstaltungsort
Bremen	Glocke
Bremen	Waterfront
Osterholz	Stadthalle
Hamburg	Stadion
Hannover	Messegelände

Abbildung 1: *Wegenetz und Veranstaltungsorte*

Zu den gemeinsamen Parametern gehört weiterhin die Zusammensetzung des Fuhrparks, der aus zwei Lkw mit je 40 Tonnen Nutzlast und einem Pkw besteht. Die Entfernungen und die Straßentypen (Stadt, Land- und Bundesstraßen sowie Autobahnen) sind internetbasierten Navigationsdiensten (Google Maps©, bzw. OpenStreetMap) entnommen. Darauf basierend wird in den betrachteten Szenarien von einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 70 km/h für die Lkw und von 100 km/h für den Pkw ausgegangen.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe sind in Tabelle 1 zu sehen. Die Spanne der insgesamt angeforderten Artikel liegt in den vier Szenarien zwischen 35 und 100, wobei es sich bei einem Artikel beispielsweise um eine einzelne Bank, einen Transportkoffer mit Technik oder eine Palette mit mehreren Stühlen handeln kann.

Tabelle 1: *Ergebnisse für zwei der eingesetzten Fahrzeuge*

Anzahl Artikel	100	75	50	35
Laufzeit (sek.)	126	35	13	4
Fahrzeug 1 (Pkw)				
Anzahl Events	3	2	2	2
Route	GLB, SH, SHO	GLB, SH	GLB, SH	GLB, SH
Gesamtstrecke(km)	296,7	251	251	251
Artikelstrecke(km)	3913,6	1875	1367	375
Artikelbelegung	13,2	7,5	5,5	1,5
Ladevolumen (m^3)	1,8	3,3	3,2	2,1
Ladegewicht (kg)	133,9	114,5	103,7	31,9
Fahrzeug 2 (Lkw)				
Anzahl Events	4	3	3	3
Route	GLB,WFB,MHH, SHO	GLB,WFB, SHO	GLB,WFB, SHO	GLB,WFB, SHO
Gesamtstrecke (km)	323,4	279,7	279,7	279,7
Artikelstrecke (km)	23276,4	4503,9	2812	2394,6
Artikelbelegung	72	16,1	10	12
Ladevolumen (m^3)	45,7	12,4	12,5	12
Ladegewicht (kg)	2286,2	596,2	573,7	534,9
Legende:	GLB/WFB:	SH:	MHH:	SHO:
	Glocke/ Waterfront Bremen	Stadion Hamburg	Messehallen Hannover	Stadthalle Osterholz

Entsprechend der heterogenen Artikeleigenschaften kann die Auslastung der Transportmittel nicht allein über die Anzahl oder das Gewicht der Artikel, sondern nur unter Berücksichtigung des Volumens ermittelt werden. In den Ergebnissen sind daher neben der durchschnittlichen Anzahl der transportierten Artikel auch der Durchschnitt der Nutzlast und die Volumenbelegung als zusätzliche Indikatoren aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Dispositionssystem in der Lage ist, die dezentrale Disposition für alle vier Größenordnungen des Testszenarios zu lösen, die Laufzeit für die Simulation liegt hier zwischen vier Sekunden für das kleinste und 126 Sekunden für das größte Szenario. Die beiden Fahrzeuge bewegen sich zwischen drei, bzw. vier Veranstaltungen und transportieren dabei zwischen 13 und 72 Artikeln, was einem Ladevolumen von 1,8m^3 (=133,9kg) für den Pkw und 45,7m^3 für den betrachteten Lkw (=2286,2kg) entspricht. Die Volumenauslastung liegt hierbei bei über 90% bzw. bei 52%. Der dritte, nicht in der Tabelle aufgeführte Lkw, ist weniger ausgelastet, er transportiert durchschnittlich 23,8 Artikel mit einem Volumen von 11,4m^3 und einem Gewicht von 603,8kg, was einer Auslastung von lediglich 13% in Bezug auf das Volumen entspricht. Die Auslastung des Pkw wurde hierbei vorranging mit Kleinartikeln (Kabel, Cateringzubehör, Personal, etc.) erzielt, die Lkw entsprechend mit den großvolumigen Artikeln beladen. Eine Verbesserung der Auslastungen wäre in diesem Fall durch eine Anpassung des Fuhrparks erreichbar, zukünftige Simulationen werden Lkw mit 7,5t und Kleintransporter mit bis zu 4t berücksichtigen.

Im Hinblick auf die Termineinhaltung gelang für alle Veranstaltungen eine zeitgemäße Anlieferung der benötigten Artikel. Bei der zeitlichen Planung wurden hier neben der Dauer der eigentlichen Veranstaltung Zeitfenster von jeweils bis zu zwei Stunden für den Aufbau und Abbau veranschlagt, die angenommene Dauer der Ladevorgänge an den Veranstaltungsorten liegt bei 30 Minuten. Weitere Restriktionen betrafen die Dauer der Gesamttouren, hier wurden Zeiten von maximal acht Stunden veranschlagt, um die Schichtlängen des Beispielunternehmens abzubilden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge nach Abschluss ihrer Touren zum Zentrallager zurückkehren und dementsprechend zu Schichtbeginn von dort aus starten.

Insgesamt betrachtet sind die Ergebnisse der ersten Testläufe vielversprechend. Es gelang, aller Veranstaltungen mit dem zur Verfügung stehenden Fuhrpark zu bedienen und hierbei die verfügbaren Zeitfenster einzuhalten. Verbesserungspotentiale deuten sich bei der erzielten Auslastung der Fahrzeuge an. Zukünftige Tests mit entsprechend hochskalierten Parametern im Hinblick auf die Anzahl der Artikel und Veranstaltungsorte sowie die Heterogenität des Fuhrparks werden hier Aufschluss über die Güte der logistischen Zielerreichung geben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dem Konzept einer selbststeuernden Disposition von Verleihartikeln auf Basis einer Multiagentensimulation. Hierzu werden die Grundlagen des Systems sowie der angewandten Selbststeuerungsmethoden vorgestellt und ein Einblick in den aktuellen Stand der Arbeiten gegeben. Die Ergebnisse der ersten Testläufe zeigen, dass die erzeugten

Planungsdaten plausibel sind und als Basis weiterer Optimierungen hinsichtlich der logistischen Zielerreichung genutzt werden können.

Die weiteren Arbeiten werden entsprechend die Optimierung der Zielfunktionen der einzelnen Agentenklassen vor dem Hintergrund größerer Szenarien betrachten. Um eine Bewertung der Leistungsfähigkeit des selbststeuernden Dispositionsansatzes zu ermöglichen, ist eine Betrachtung der zugrunde gelegten Testszenarien mittels etablierter Tourenplanungsansätze geplant. Diese wird einen direkten Vergleich hinsichtlich der Güte der erzielten Dispositionsergebnisse ermöglichen.

Im Hinblick auf die Durchführung der Simulationsläufe wird die dynamische Berücksichtigung neuer, planungsrelevanter Ereignisse angestrebt, so dass keine iterativen Neustarts der Simulation mehr notwendig sind. Ergänzend zu den logistischen und informationstechnischen Optimierungspotentialen wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigen, inwiefern das konzipierte Dispositionssystem in der Veranstaltungslogistik, bzw. allgemein im Umlaufmanagement von Verleihartikeln ökonomisch einzusetzen ist.

Danksagung

Dieser Beitrag entstanden unter Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 637 – Teilprojekt T6.

Literatur

Allen, J.; O'Toole, W.; Harris, R.; & McDonnel, I.: Festival and Special Event Management (5. Ausg.). Hoboken, NY, USA: John Wiley and Sons 2010.

Applegate, D.; Bixby, R.; Chvatal, V.; Cook, W.: The Travelling Salesman Problem: A Computational Study. Princeton: Princeton University Press 2006.

Bellifemine, F.; Caire, G.; Vitaglione, G.; Rimassa, G.; Greenwood, D.: The JADE Platform and Experiences with Mobile MAS Applications. In R. Unland, M. Klusch, & M. Calisti, Software Agent-Based Applications, Platforms and Development Kits - Whitestein Series in Software Agent Technologies (S. 1-20). Basel: Birkhäuser 2005.

Ferber, J., Gutknecht, O.; Michel, F.: From agents to organisations: An organisational view of multi-agent systems. In P. Giorgini, J. Möller, & J. Odell (Hrsg.), Lecture Notes in Computer Science - Agent-Oriented Software Engineering IV (Bd. 2935, S. 214-230). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag 2004.

Gehrke, J.; Herzog, O.; Langer, H.; Malaka, R. P.; Warden, T.: An Agent-based Approach to Autonomous Logistic Processes - Colloborative Research Centre 637: Autonomous Cooperating Logistic Processes. KI-Künstliche Intelligenz, 24(2) 2010, S. 137-141.

Ghaziri, H.; Osman, I.: Self-Organizing Feature Maps for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. Journal of Scheduling 2006, 9, S. 97 - 114.

Gudehus, T.: Auftragsdisposition und Produktionsplanung. In T. Gudehus, Logistik 1 - VDI Buch (S. 279-317). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag 2012.

Gudehus, T.: Dynamische Disposition - Strategien, Algorithmen und Werkzeuge zur optimalen Auftrags-, Bestands- und Fertigungsdisposition (3. Ausg.). Berlin: Springer Verlag 2012.

Harjes, F.; Scholz-Reiter, B.: Autonomous control in event logistics. In M. Affenzeller, A. Bruzonne, F. De Felice, C. Del Rio Vilas, M. Frydman, M. Massei, & Y. Merkuryev (Hrsg.), Proceedings of the 11th International Conference on Modeling and Applied Simulation 2012 (S. 302-308). Rende (CS), Italy: DIME, University of Genua.

Huth, T.; Mattfeld, D.: Integration of Routing and Resource Allocation in Dynamic Logistic Networks. In H.-J. Kreowski, B. Scholz-Reiter, & H.-D. Haasis (Hrsg.), Dynamics in Logistics (S. 85-93). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag 2008.

Larsen, A.:. The Dynamic Vehicle Routing Problem. PhD Thesis. Lyngby: IMM 2001.

Parragh, S.; Doerner, K.; Hartl, R.: A survey on pickup and delivery problems. Part II: Transportation between pickup and delivery locations. Journal für Betriebswirtschaft 2008.(58), S. 81-117.

Rekersbrink, H.: Methoden zum selbststeuernden Routing autonomer logistischer Objekte - Entwicklung und Evaluierung des Distributed Logistics Routing Protocol (DLRP). Dissertation, Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Bremen, 2009.

Rekersbrink, H.; Makuschewitz, T.; Scholz-Reiter, B.: A Distributed Routing Concept for Vehicle Routing Problems. Logistics Research 1 (2008), S. 45-52.

Rieck, J.: Problemstellungen der Tourenplanung. In J. Rieck, Produktion und Logistik - Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen (S. 7-50). Wiesbaden: Gabler Verlag 2009.

Scholz-Reiter, B.; Sowade, S.; Hildebrandt, T.; Rippel, D.: Modeling of Orders in Autonomously Controlled Logistic Systems. Production Engineering Research & Development 4 (2010), S. 319-325.

Warden, T.; Porzel, R.; Gehrke, J. H.; Langer, H.; Malaka, R.: Towards Ontology-based Multiagent Simulations. In E. Bargelia, A. Azam, S. Ali, & D. Crowley (Hrsg.), 24th European Conference on Modeling and Simulation (ECMS2010), (S. 50-56). Kuala Lumpur 2010.

Wenger, W.: Generelle Tourenplanungsprobleme. Multikriterielle Tourenplanung, S. 39-92 2010.

Windt, K.; Hülsmann, M.: Changing Paradigms in Logistics - Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control. In M. Hülsmann, & K. Windt (Hrsg.), Understanding Autonomous Cooperation & Control - The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow (S. 4-16). Berlin: Springer Verlag 2007.

Wooldridge, M.: An Introduction to MultiAgent Systems (2 Ausg.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons 2009.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulationsgestützte, Selbstadaptierende Wissensbasierte Steuerung von logistischen Systemen

Control of Logistic Systems – Introducing self-adaptation using a parameterised simulation model

Alexander Klaas, Christoph Laroque, Hendrik Renken, Wilhelm Dangelmaier,
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Paderborn (Germany),
alexander.klaas@hni.upb.de, christoph.laroque@hni.upb.de,
hendrik.renken@hni.upb.de, wilhelm.dangelmaier@hni.upb.de

Abstract: Simulation as a source of knowledge has recently been used in the control of logistics systems. Little research has been done however on ensuring a consistently high quality of the data generated by the simulation, especially under changing circumstances such as differing load patterns in the system. We propose a control that is able to self-adapt to current circumstances using a parameterised simulation model, which uses observed system parameters as input. The control automatically triggers re-generation of training examples when necessary and proactively anticipates changes. For the problem of knowledge generation, we present a look ahead simulation method that considers uncertainties. We validated our approach in a real world material handling system, developed by Lödige Industries GmbH.

1 Einleitung

Die operative Steuerung von Produktions- und Logistiksystemen ist durch eine hohe Dynamik und Komplexität charakterisiert. Der Einsatz von wissensbasierten Steuerungen, speziell in Kombination mit Simulation, bietet sich daher bei der Lösung der auftretenden, typischerweise NP-schweren Problemen an (Aufenanger et al. 2008; Kwak und Yih 2004; Sakakibara et al. 2008).

Bei einer auftretenden Steuerungssituation im System wird dabei anhand gesammelten Wissens und mithilfe von Methoden der Künstlichen Intelligenz eine Steuerungsmaßnahme ausgewählt. Die Simulation kann dabei als Wissensquelle agieren, indem sie das Verhalten des zu steuernden Produktions- oder Logistiksystemes unter verschiedenen Szenarien nachbildet (Müller-Schloer et al. 2011). Es wird eine Wissensbasis in Form von Trainingsbeispielen in einer parallel, aber offline laufenden Phase mittels der Simulation aufgebaut.

Die Leistung des Systems hängt subsequent von der bereitgestellten Wissensbasis ab. Dabei sind unter anderen zwei Problemen zu lösen:

- Die auftretenden Steuerungssituationen sind nicht in der Wissensbasis enthalten, woraufhin die Steuerung keine fundierte Entscheidung treffen kann.
- Unsicherheiten im Betriebsablauf sind in der Simulation zu berücksichtigen, um sicher zu stellen, dass die gewählte Steuerungsmaßnahme nicht nur unter bestimmten Umständen eine hohe Leistung liefert.

In dieser Arbeit wird eine selbstadaptierende Steuerung vorgestellt, die sich an Gegebenheiten im System anpasst, um stets relevantes Wissen zur Verfügung zu haben. Zudem werden in einer simulationsbasierten Bewertung von Steuerungsmaßnahmen verschiedene Szenarien herangezogen.

Die Selbstanpassung wird mittels eines parametrisierten Simulationsmodelles des Systems realisiert, das mit aktuellen sowie antizipierten Werten aus dem System simuliert wird. Die Parameter sind dabei variable Rahmendaten wie etwa die Anzahl der Mitarbeiter. Es werden genaue Kriterien zur Definition eines Parameters in einem konkreten System dargelegt. Das Konzept ist unabhängig von einem konkreten zu steuernden System beschrieben, sodass es leicht auf verschiedene Produktions- und Logistiksysteme angewendet werden kann.

Im Ergebnis kann somit die Flexibilität und Robustheit von wissensbasierten Steuerungen gesteigert werden. Das Konzept findet zur Validierung Anwendung in einem industriellen Projekt bei der Steuerung eines vollautomatisierten Material Handling Systems der Firma Lödige Industries GmbH, bei dem zahlreiche externe Einflüsse und Unsicherheiten die Steuerung vor Herausforderungen stellen. Die Anwendung und Ergebnisse sind in Abschnitt 4 dargelegt. Es konnte eine Erhöhung der Leistung um 14.2% erzielt werden.

2 Stand der Technik

Erste Ansätze im Bereich der wissensbasierten Steuerung von logistischen Systemen wurden zu Beginn der neunziger Jahre gemacht. Unter anderen stellen Piramuthu et al. (1993) heraus, dass die Effektivität von Prioritätsregeln vom aktuellen Systemstatus, der durch Attribute und deren jeweilige Ausprägung beschrieben wird, abhängt. Weiterentwicklungen dieser situationsabhängigen Steuerungen sind etwa Bergmann und Stelzer (2011), Jeon et al. (2011), Maza und Castagna (2005) und Vitiello (1997).

Speziell der Einsatz von simulations- oder heuristikbasierten Lösungsverfahren in einer offline Trainingsphase zur Generierung von Trainingsbeispielen wird hier näher betrachtet. Es wurde in Aufenanger et al. (2008) zur Lösung von Job Shop Scheduling Problemen angewendet, in Kwak und Yih (2004) wiederum für Dispatching in Produktionssystemen. Dasselbe Prinzip findet in Klaas et al. (2011) und Sakakibara et al. (2008) Anwendung bei der Steuerung von fahrerlosen Transportsystemen.

Diese generischen Verfahren haben den Vorteil, dass sie ohne eines dem jeweiligen Problem angepassten Lösungsalgorithmus auskommen. Allerdings fehlt jegliche Anpassungsfähigkeit der offline Phase an Gegebenheiten im System.

Der Einsatz einer parametrisierten Simulation zur fortlaufenden Lösungsgenerierung und Anpassung wird in Branke et al. (2006) in Form eines allgemeinen Frameworks

beschrieben. Es wird speziell auf den Aspekt einer Anpassungskomponente eingegangen. Es fehlen ein allgemein verwendbarer Ansatz, wie die Parameter der Parameter zu bestimmen sind sowie ein umfassendes Konzept zur Bewertung der bisher generierten Trainingsbeispiele.

Das zu steuernde System wird in bisherigen Verfahren unter Normalbedingungen simuliert, das heißt dass die darauf basierenden Entscheidungen womöglich nicht robust gegenüber Abweichungen sind. Es fehlt ein Konzept, wie unter verschiedenen Entwicklungen simuliert werden kann. Diese Methoden existieren im Bereich der Szenariokonstruktion in der stochastischen Programmierung, einem Teilbereich des Operations Research, wie in Laux (2005), Scholl (2001) und Vahrenkamp & Amann (2007) dargelegt.

3 Generisches Konzept

Es wurde eine wissensbasierte Steuerung entwickelt, die über die gewünschten selbstadaptierenden Eigenschaften verfügt, sowie mittels einer simulationsbasierten Vorausschau Unsicherheiten berücksichtigt. Viele Aspekte der Steuerung lassen sich unabhängig von dem konkreten zu steuernden System betrachten, sodass in diesem Abschnitt zunächst ein generisches Konzept dargelegt werden soll.

In Abschnitt 3.1 wird ein Überblick präsentiert, während einzelne Komponenten des Konzeptes in den Abschnitt 3.2 bis 3.4 detailliert werden.

3.1 Überblick

In Abbildung 1 ist das entwickelte Konzept dargestellt. Ein Klassifizierer reagiert auf im zu steuernden System aufgetretene Steuerungssituationen und wählt in Echtzeit die in der Situation als optimal befundene Maßnahme aus. Diese Entscheidung basiert auf Trainingsbeispielen, die a priori in einer Offlinephase mit Methoden des maschinellen induktiven Lernens ausgewertet wurden. Die Trainingsbeispiele bestehen dabei aus Situation-Maßnahmen Zuordnungen. Dabei steht eine endliche, kleine Menge von Maßnahmen zur Verfügung, während eine Situation als Tupel von möglichen Einflussfaktoren definiert ist.

Das Ziel ist es nun, möglichst relevante Trainingsbeispiele in hoher Qualität zu generieren. Relevanz bedeutet hier, dass die Situationen auf der linken Seite der Trainingsbeispiele möglichst ähnlich zu den tatsächlich auftretenden Steuerungssituationen sind. Hohe Qualität bedeutet, dass die zugeordnete Maßnahme die Leistung des Systems maximiert, auch unter verschiedenen definierten zukünftigen Umständen, deren Eintreten nicht vorhergesagt werden kann.

Es existiert eine Anpassungskomponente, die sicherstellen soll, dass die Trainingsbeispiele kontinuierlich eine hohe Relevanz haben. Anhand der aktuellen Situationen, soweit weiterer auszulesenden Systemparameter und Ereignissen, entscheidet die Anpassungskomponente ob und ggf. unter welchen Parametern neue Trainingsbeispiele generiert werden. Dabei werden mittels einer Prognose auch zukünftige Änderungen antizipiert. Systemparameter werden in Abschnitt 3.2 definiert, und Details zur Anpassung in Abschnitt 3.3 genannt.

Die festgelegten Parameter werden in ein parametrisiertes Simulationsmodell überführt, das mittels der Simulationssoftware d³fact das System in der zu

erwartenden Konfiguration simuliert. An dieser Stelle greift die Vorschaufunktionalität (Abs. 3.4), mittels der die möglichen Maßnahmen in einer Steuerungssituation bewertet werden. Die Vorschau evaluiert auch das Systemverhalten unter verschiedenen stochastischen Einflüssen und aggregiert die Leistung jeder Maßnahme in diesen simulierten Zukünften.

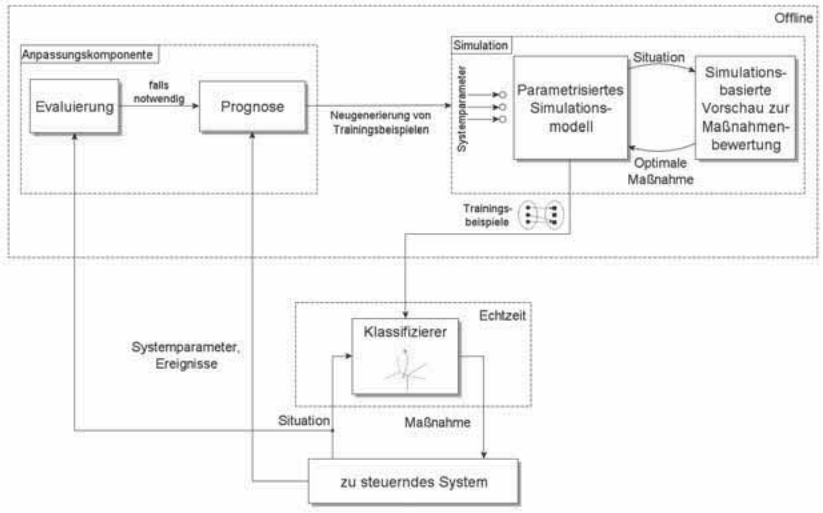


Abbildung 1: *Übersicht des entwickelten Konzeptes mit Anpassungskomponente und simulativer Vorausschau.*

3.2 Parameterdefinition

Das Konzept sieht vor zwischen Steuerungssituationen, Systemparametern und Ereignissen zu unterscheiden.

Eine Steuerungssituation stellt kurzfristig veränderbare Umstände im System dar, von denen die Entscheidung, welche Maßnahme optimal ist, abhängt. Als Beispiel sei die offene Auftragsmenge genannt.

Systemparameter dagegen stellen sich langfristig verändernde Einflüsse dar, zum Beispiel die Anzahl an Maschinen, an dessen Änderung sich die Steuerung selbst anpassen soll, etwa um die Inbetriebnahme einer neuen Maschine berücksichtigten zu können. Der Wert der Systemparameter kann auch beeinflussen, welche Situationen auftreten werden, da im Beispiel etwa eine geringe Anzahl an Maschinen eine große offene Auftragsmenge bedingt.

Ein Ereignis ist definiert als eine plötzliche, unerwartete Änderung im System, die zu einer Änderung der folgenden Steuerungssituationen und optional auch dauerhaft einem oder mehrerer Systemparameter führt. Für eine Anwendung wird dazu eine Menge an Ereignissen definiert, die berücksichtigt werden sollen, wie etwa der Ausfall einer Maschine. Das Auslesen eines Ereignisses soll dann speziell die Veränderung eines Systemparameters detektieren und ggf. eine Neugenerierung zur Folge haben.

3.3 Anpassungskomponente

Die Anpassungskomponente ist in zwei Teilkomponenten gegliedert: Eine Evaluierungskomponente ermittelt anhand der tatsächlich im System aufgetretenen Steuerungssituationen die Relevanz der erzeugten Trainingsbeispiele. Relevanz ist dabei mittels der verallgemeinerten Hamming Distanz $d_S : S \times S \rightarrow [0,1]$ (Beierle und Kern-Isberner 2008)

$$d_S(s_1, s_2) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \min(1, \max(0, \frac{|s_{1_i} - s_{2_i}|}{i_o - i_u}))}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (1)$$

definiert. Dabei sind s_1 und s_2 Steuerungssituationen, die als Vektor $\in \mathbb{R}^n$ vorliegen, während w_i den Informationsgehalt eines Attributes des Vektors darstellt. i_u und i_o sind die für die konkrete Situationsdefinition in einer Anwendung gegebenen angenommenen Unter- und Obergrenzen der Komponente i. Die Hamming Distanz gibt also ein Maß für die Ähnlichkeit von zwei Steuerungssituationen an. Mittels dieser kann nun bei Auftreten einer neuen Steuerungssituation s_a ein binäres Relevanzkriterium bei Unterschreiten eines Schwellwertes d definiert werden:

$$R(S_{erz}, s_a) = \min_{s_e \in S_{erz}} d_S(s_e, s_a) \leq d \quad (2)$$

Der Schwellenwert wird dabei anhand der Distanz von zwei Situationen, denen verschiedene Maßnahmen zugeordnet wurden, berechnet. Bei zu geringer Relevanz ist nicht das passende Wissen vorhanden, um in ausreichender Qualität zu steuern. Diesem Fall wird mittels Anpassung der Parameter, unter dem die Simulation neue Trainingsbeispiele erzeugt, in der Anpassungskomponente entgegnet.

Zusätzlich wird durch Überwachen von Systemparametern und Ereignissen im System versucht, eine solche Irrelevanz proaktiv zu antizipieren, um nicht nur a posteriori reagieren zu können. Schließlich findet die Neugenerierung der Trainingsbeispiele aufgrund der benötigten Rechenzeit offline statt, sodass bei erkannter Irrelevanz nicht mehr rechtzeitig das erforderliche Wissen zur Verfügung gestellt werden kann.

Eine Prognosekomponente erstellt daher anhand des bisherigen Systemparameterverlaufes eine Vorhersage für zukünftige Systemparameter. Es wurden dabei verschiedene Prognoseverfahren analysiert und empirisch getestet. Dabei wurde die exponentielle Glättung 2. Ordnung als universal einsetzbare und geeignete Methode identifiziert (Armstrong 2001). Zusätzlich zu den tatsächlichen Prognosewerten wird die Neugenerierung mit Streuwerten durchgeführt, um Fehler in der Vorhersage zu kompensieren. Bei zutreffender Prognose kann das Verfahren dann a priori neue Trainingsbeispiele generieren und ggf. alte löschen, um so eine konstant hohe Lösungsqualität zu erreichen.

3.4 Simulationsbasierte Vorschau

Unter den vorgegebenen Systemparametern wird die Simulation gestartet, in der Steuerungssituationen auftreten. Diese Situationen sollen zur Generierung eines

Trainingsbeispiels einer optimalen Maßnahme zugeordnet werden. Dazu wird bei Auftreten die simulative Vorausschau gestartet, mittels der die zukünftige Leistung des Systems unter Auswahl jeder Maßnahme simuliert wird. Die Maßnahme mit der höchsten Leistung kann dann zusammen mit der ursprünglichen Situation als Trainingsbeispiel abgespeichert werden.

Dabei wird die Bewertung der Leistung einer Maßnahme unter verschiedenen zukünftigen Entwicklungen des Systems betrachtet, um robust gegenüber verschiedenen Szenarien und unerwarteten Ereignissen zu steuern. Zur Umsetzung der Bewertung wird zunächst implizit ein Szenariobaum aufgestellt, der den Verlauf des Systems unter verschiedenen Entwicklungen beschreibt. Zusätzlich werden Unsicherheiten berücksichtigt, indem etwa der Eintritt eines Ereignisses in jedem Zweig mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit dargestellt wird. In der Simulation lässt sich jedes der Szenerien gezielt nachbilden, um die Leistung des Systems in dieser "`Zukunft"' zu messen. So ergeben sich, aus Sicht der ursprünglichen Steuerungssituation, mehrere Kennzahlen pro Maßnahme, die miteinander zu einer endgültigen Bewertung verrechnet werden müssen.

Zur Verrechnung mehrerer Szenarien mit unterschiedlichen angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeiten wurde hier das sogenannte Hodges-Lehmann Prinzip aus der Entscheidungstheorie angewendet (Hodges Jr und Lehmann 1952). Damit wird eine gewisse Risikoaversität erreicht, indem Maßnahmen, unter denen eine sehr schlechte Leistung möglich ist, überproportional negativ bewertet werden.

Um die exponentielle Anzahl an Szenarien in der offline Phase bewältigen zu können, wird ein anwendungsspezifisches Pruning Verfahren eingesetzt, um nicht benötigte Szenarien nicht zu simulieren. Zudem wird das Verfahren parallisiert ausgeführt, was je nach eingesetzter Hardware zu einer linearen Verbesserung der Laufzeit führt.

Die erzeugten Trainingsbeispiele werden mittels induktiven Lernverfahren ausgewertet, um eine verbesserte Generalisierbarkeit auf neue Situationen und gleichzeitig eine schnellere Laufzeit zu erreichen. Dabei sind verschiedene Lernverfahren empirisch für die jeweilige Anwendung zu testen.

4 Anwendung an einer konkreten Steuerung

Das vorgestellte Konzept wurde zur Steuerung eines industriellen Material Handling Systems (MHS) der Firma Lödige Industries GmbH angewendet und konnte damit praxisnah validiert werden.

4.1 Abstrakte Beschreibung

Aus Vertraulichkeitsgründen wird in dieser Arbeit lediglich die grundlegende Funktionalität des MHS beschrieben (s. Abb. 2).

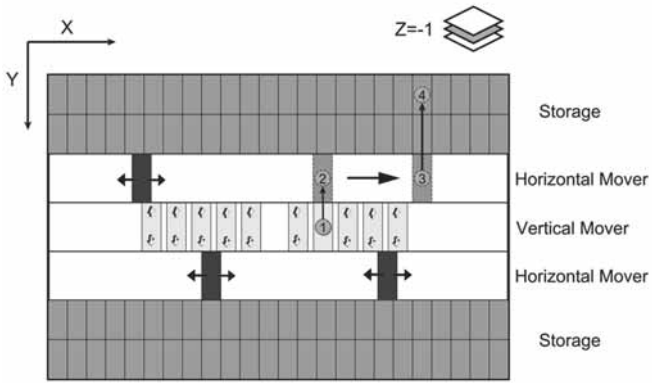


Abbildung 2: *Funktionsweise MHS*

In dem MHS wird Material in unterirdische Ebenen (z=-1,…-n) vollautomatisch ein- und ausgelagert. Dazu werden vertikal (VM) und horizontal (HM) bewegte Fördereinheiten eingesetzt. Die dynamische Beauftragung der Fördereinheiten soll mittels des entwickelten Konzeptes geschehen, welches sich aufgrund der hohen Dynamik und hohen Anzahl an Einflussfaktoren anbietet. Ziel ist die Minimierung der Wartezeiten für Ein- und Auslageraufträge.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass das Material in zwei Reihen eingelagert wird, sodass ein Zugriff auf eine hintere Reihe ggf. das Umlagern eines Materials bedingt. Dieser Vorgang wird Shuffle genannt und ist möglichst zu vermeiden.

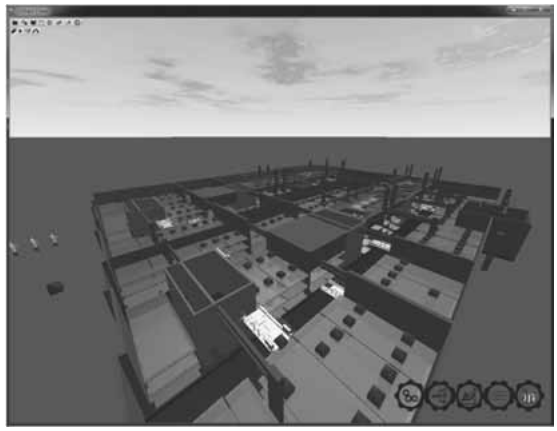


Abbildung 3: *Screenshot 3D Visualisierung*

Es wurde in dem Materialflusssimulator d³fact ein Modell des MHS erstellt (s. Abb. 3). Dieses diente bei der Anwendung des Verfahrens initial als Hilfestellung, da anhand einer 3D Darstellung die Abläufe untersucht werden konnten. Gleichzeitig lässt sich das Simulationsmodell zur laufzeiteffizienten Generierung der Trainingsbeispiele (s. Abs. 3) ohne visuelle Ausgabe verwenden.

4.2 Anwendung des generischen Konzeptes

Zur Adaption wurden die anwendungsspezifischen Aspekte des Konzeptes wie folgt ausgefüllt. Zunächst wurden drei Strategien entwickelt, die je nach Lastsituation einen verschiedenartigen Betriebsablauf definieren.

- Das sogenannte *Prefetching* bedeutet, dass bei einer Einlagerung ein HM frühzeitig zum jeweiligen VM befördert wird – was zu Lasten einer HM Verfügbarkeit bei einer Auslagerung führen kann.
- *Umlagern* bezeichnet die Beförderung von Fahrzeugen von „inneren“ (an den VMs) hin zu „äußeren“ Stellplätzen, falls ein HM verfügbar ist.
- Bei der *Stellplatzauswahl* bei einer Einlagerung sind analog dazu zwei Möglichkeiten auszuwählen, das Auswählen des Platzes von innen nach außen oder in umgekehrter Reihenfolge. Hintergrund ist die Überlegung, dass bei einer hohen Einlagerlast viele freie Stellplätze in der Nähe der VMs günstig sind, um ein Fahrzeug schnell einlagern zu können. Diese sollten in Phasen geringer Last daher vorgehalten werden.

Die Maßnahmen der Steuerung wurden nach drei Kombinationen von Strategien definiert, nach denen Aufträge sinnvoll bedient werden können und sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: *Maßnahmen der Steuerung*

Maßnahme	Prefetching	Umlagern	Stellplatzauswahl
„Standard“	Nein	Nein	Innen nach außen
„Wartung“	Nein	Ja	Außen nach innen
„Einlagerung Priorität“	Ja	Nein	Innen nach außen

Eine Situation entspricht der aktuellen und den im Tagesverlauf bisherigen Lastsituationen, da diese die bestimmende fluktuierende, externe Einflussgröße auf die Maßnahmenauswahl darstellt.

Als Systemparameter ist dementsprechend die Tageskurve der Last im Wochendurchschnitt definiert, da die Selbstanpassung auf die mittelfristige Änderung des Nutzerverhaltens ausgelegt ist. Als Ereignis in der Vorausschau ist ein plötzlicher Anstieg an Auslageraufträgen definiert.

In der simulationsbasierten Bewertung einer Maßnahme wird zu einer gegebenen aktuellen Lastsituation dann die Leistung des Systems unter Anwendung jeder der drei Maßnahmen, unter Berücksichtigung des Eintretens eines plötzlichen Anstiegs und bis zum Ende eines Tages simuliert. Aus dieser hohen Anzahl an Szenarien bestimmt das Verfahren letztlich die optimale Maßnahme anhand der gemessenen Leistungskennzahl der durchschnittlichen Wartezeit eines Auftrages.

5 Experimentelle Evaluierung

Anhand einer exemplarischen Tageskurve, die Zeiten von hoher und geringer Last beinhaltet, wurden mittels der simulationsbasierten Vorausschau Trainingsdaten generiert und das Verfahren empirisch evaluiert. Bei der Generierung wurde dabei ein plötzlicher Anstieg an Auslageraufträgen berücksichtigt, was zu einer verschiedenen Maßnahmenauswahl in einer bestimmten Situation führte. Während unter normalen Umständen die Maßnahme „Wartung“ eine Verbesserung von 1,5% im Vergleich zur „Standard“ Maßnahme bewirkt, führte diese im Ereignisfall zu einer Verschlechterung von 2,8%. In der Aggregation mittels Hodges-Lehmann schnitt daher die „Standard“ Maßnahme besser ab.

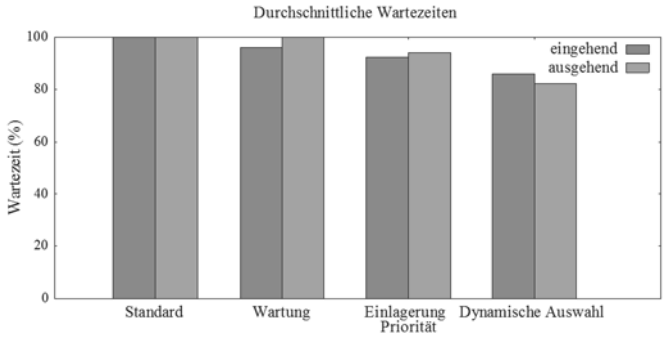


Abbildung 4: *Experimentelle Ergebnisse*

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse dargestellt. Es wurde das Verfahren (dynamische Auswahl einer Maßnahme) im Vergleich zur konstanten Auswahl jeder der drei Maßnahmen evaluiert. „Einlagerung Priorität“ resultiert dabei in etwa 7% kürzere Wartezeiten. Anscheinend ist ein aktiviertes Prefetching von Vorteil, vermutlich da die VMs im betrachteten System einen Flaschenhals darstellen. Die dynamische Auswahl mittels des trainierten Klassifizierers wiederum erzielt eine weitere Verkürzung der Wartezeiten um 9.8%. Eine detaillierte Auswertung hat gezeigt, dass das Umlagern und Vorhalten von inneren Stellplätzen für Zeiten von hoher Last Vorteile zeigt. In diesen Phasen müssen die HMs eine um 2,7% kürzere Weglänge bewältigen, und dadurch halbiert sich die Zeit, die VMs auf HMs warten müssen.

6 Zusammenfassung

Es wurde ein Konzept zur selbstadaptierenden Steuerung allgemein dargelegt und anhand eines Material Handling System validiert. Die Ergebnisse demonstrieren eine höhere Leistung durch die dynamische Auswahl von Steuerungsmaßnahmen. Die Steuerung kann sich an verschiedene Lastszenarien selbst anpassen und berücksichtigt stochastische Ereignisse.

Mögliche Weiterentwicklungen des Konzeptes beinhalten eine automatisierte Evaluierung und Anpassung der Steuerungsmaßnahen und Situationsdefinition.

Literatur

Armstrong, J.S.: Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners, Springer 2001.

Aufenanger, M. et al.: Knowledge-based event control for flow-shops using simulation and rules. In S. J. Mason et al., eds. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2001, pp. 1952–1958.

Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH 2008

Bergmann, S.; Stelzer, S.: Approximation of Dispatching Rules in Manufacturing Control Using Artificial Neural Networks. In Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS), 2011 IEEE Workshop on. S. 1–8.

Branke, J. et al.:Organic Computing - Addressing Complexity by Controlled Self-Organization. In Proceedings of the Second International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. ISOLA '06. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society 2006, S. 185–191.

Hodges Jr, J.L.; Lehmann, E.L.: The use of previous experience in reaching statikalaastical decisions. The Annals of Mathematical Statistics, 1952, S.396–407.

Jeon, S., Kim, K.; Kopfer, H.: Routing automated guided vehicles in container terminals through the Q-learning technique. Logistics Research, (2011) 3(1), S.19–27.

Klaas, A. et al. Simulation Aided, Knowledge Based Routing for AGVs in a Distribution Warehouse. In S. Jain et al., eds. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2011, pp. 1673–1684.

Kwak, C.; Yih, Y.: Data-mining approach to production control in the computer-integrated testing cell. Robotics and Automation, IEEE Transactions on (2004) 20, S.107–116.

Laux, H.: Entscheidungstheorie, Springer 2005.

Maza, S.; Castagna, P.: A performance-based structural policy for conflict-free routing of bi-directional automated guided vehicles. Comput. Ind. (2005) 56, S.719–733.

Müller-Schloer, C.; Schmeck, H.; Ungerer, T.: Organic Computing - A Paradigm Shift for Complex Systems. Basel: Springer Basel AG 2011.

Piramuthu, S. et al.: Integration of simulation modeling and inductive learning in an adaptive decision support system. Decis. Support Syst. 9 (1993), S.127–142.

Sakakibara, K., Fukui, Y.; Nishikawa, I.: Genetics-Based Machine Learning Approach for Rule Acquisition in an AGV Transportation System. Intelligent Systems Design and Applications, International Conference on (2008) 3, S.115–120.

Scholl, A.: Robuste Planung Und Optimierung: Grundlagen Konzepte Und Methoden Experimentelle Untersuchungen. Physica-Verlag 2001.

Vahrenkamp, R.; Amann, M.: Risikomanagement in supply chains: Gefahren abwehren, Chancen nutzen, Erfolg generieren. Berlin: Schmidt 2007.

Vitiello, M.: Fallbasierte Materialflußsteuerung. Düsseldorf: VDI-Verl 1997.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Using Simulation to compare Aircraft Boarding Strategies

Ein simulationsbasierter Vergleich von Boarding Strategien für Passagierflugzeuge

Pau Fonseca i Casas, Operations Research Dept., Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (Spain), pau@fib.upc.edu

Angel A. Juan, Computer Science Dept., IN3-Open University of Catalonia, Barcelona (Spain), ajuanp@gmail.com

Silvia Mas, Dept. Telecom. and Systems Eng., Autonomous University of Barcelona, Barcelona (Spain), silvia.masm@campus.uab.cat

Abstract: The boarding process has a very important role in the objective of increase the efficiency, profitability, and customer satisfaction of an airline industry. It is one of the significant elements of the turnaround time, a slow boarding process might lead to financial issues to the company and, of course, customer complaints. In this paper are analyzed three boarding strategies presenting a model and an easy to use tool that implements it. The study suggest that differences exists among them, and proposes the most efficient strategy.

1 Introduction

It has been found that many previous works refer to the boarding process as a problem, since it is an activity that cannot start until processes such as fuelling, cleaning or catering are ready. Of course, the main priority during a boarding process is always safety, rather than carrying out a fast boarding. This explains why sometimes the boarding process does not start until fueling is finished, even when it could be done. In addition to this, airline managers have to be aware that the most cost-effective boarding process will have to maintain quality and customer satisfaction.

One of the purposes in reducing the boarding time refers to reduce the number of interferences between passengers inside the airplane. A boarding interference is defined as an instance of a passenger blocking the access of another passenger to his seat. Therefore, the minimization of the total boarding time is related to the minimization of passenger interferences. Also, the total boarding time is related to the number of carry-on luggage that passengers have.

This paper is mainly focused on the boarding process using a bridge. The most popular boarding strategies adopted by the airlines are the following:

- Back-to-front (BtF) boarding policy is the traditional strategy, adopted by most airlines for both narrow and wide-body aircraft. This strategy consists in boarding first class firstly. Then, passengers are called in groups to board the aircraft, following the sequence from back to front.
- Front-to-Back (FtB) boarding policy is other strategy. This strategy consists in boarding first class firstly. Then, passengers are called in groups to board the aircraft, following the sequence from front to back.
- Random boarding strategy does not specify any condition while boarding passengers and the aircraft is boarded in one zone randomly. First class passengers are also boarded firstly. Then, passengers board the airplane in a first-come first-serve basis; or in other words, following a FIFO process (first-in first-out).

In this paper, simulation is used to analyse the aforementioned policies in order to search for the most efficient boarding strategy. The paper is structured as follows: section 2 provides a brief overview of related work. Section 3 describes the model and section 4 includes some numerical experiments. Finally, section 5 summarizes the main results.

2 Related work

The aircraft passenger boarding problem has been previously studied mostly through simulation-based solutions for analysing and improving passenger airplane boarding. Marelli et al. (1998) conducted a simulation-based analysis performed for Boeing. Boeing Corporation created a computer simulation model called Boeing Passenger Enplane/Deplane Simulation (PEDS). The result of its study was that the outside-inside boarding strategy reduced boarding times significantly. Van Landeghem and Beuselinck (2002) carried out a simulation study based on airplane boarding. According to this study, the fastest way to board the passengers on an airplane was to do it individually by their row and seat number. Van den Briel et al. (2005) did not take into account airplane design parameters, and the study showed how strategies based on reducing interferences are better than the traditional back-to-front policy. These authors designed the so-called reverse-pyramid method, with the aim of boarding passengers while utilizing as much as possible the aircraft. The model was mainly developed to minimize passenger boarding interferences, and it was used MINLP, a mixed-integer nonlinearly constrained optimization solver.

Bauer et al. (2007) developed a computer simulation to model the boarding process. These authors considered different boarding strategies and individual variations of passengers. Additionally, they treated the boarding problem as a stochastic process, and specifically, they used queuing theory to reach a better understanding of bottlenecks and their effects.

3 The model

Our model is defined using Specification and Description Language (ITU-T, 2012), a graphical formalism that allows a complete and unambiguous representation of the system behaviour. This formal representation of the model simplify its

implementation using different platforms and tools, and also helps us in the future improvement of the model.

The main diagram SYSTEM, represented in Figure 1, contains the main processes (SDL PROCESS) that compose the model. In our case 3 processes defines the behaviour of the model:

1. P_PAXArrivals: Defines the arrivals of passengers to the finger in order to start the boarding process. In this process first are considered the passengers for the first class.
2. P_FingerDoor: Represents the waiting zone where the passengers wait until starts his boarding process. Here are defined the different algorithms that rules the way the passengers enters in the plane.
3. P_Plane: In this model, the plane is just a PROCESS that represents the boarding process, in this model is not represented the complete structure of the plane, only the positions that own.

This first diagram details the structure of the model.

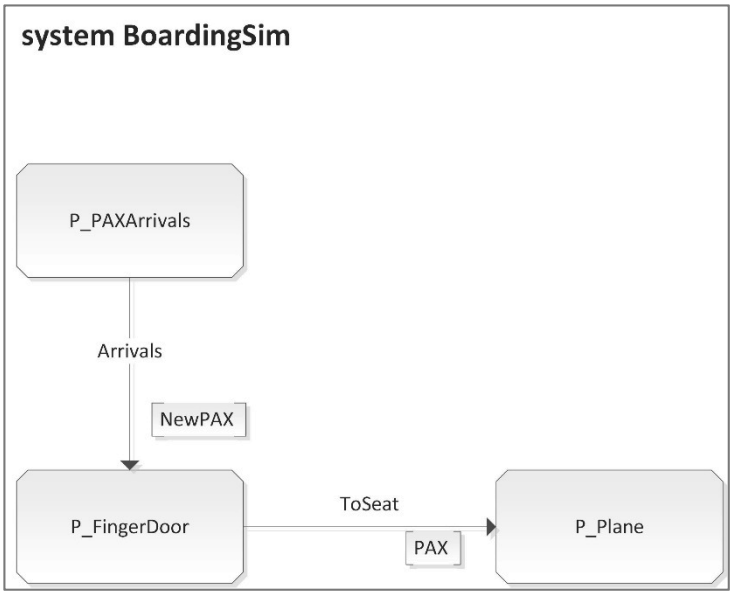


Figure 1: *System diagram, model main elements. Here the three main process that defines the model behaviour are represented.*

Each one of these SDL PROCESS can be detailed, defining the behaviour of the model. Figure 2, Figure 3 and Figure 4 details the behaviour for *P_FingerDoor* and *P_Plane*. *P_PAXArrivals* is a process that define the arrival process of the different passengers to the model. In our case this process is quite simple, since we suppose that all the passengers are at the beginning of the boarding process in the gate.

P_FingerDoor PROCESS (Figure 2) details the movement of the different passenger's thought the gate to the plane. Here is assigned the seat for each passenger on a PROCEDURE named *AssignSeat*. This procedure depends on the policy to test,

represented by a number (1 representing Random, 2 representing BtF and 3 representing FtB).

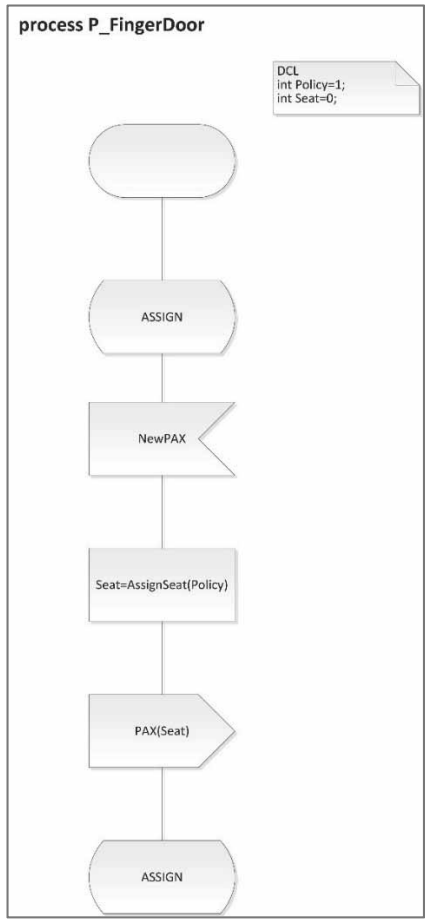


Figure 2: *PROCESS P_FingerDoor, on the PROCEDURE AssignSeat is defined what is the seat to be used by a passenger depending on the Policy we want to test.*

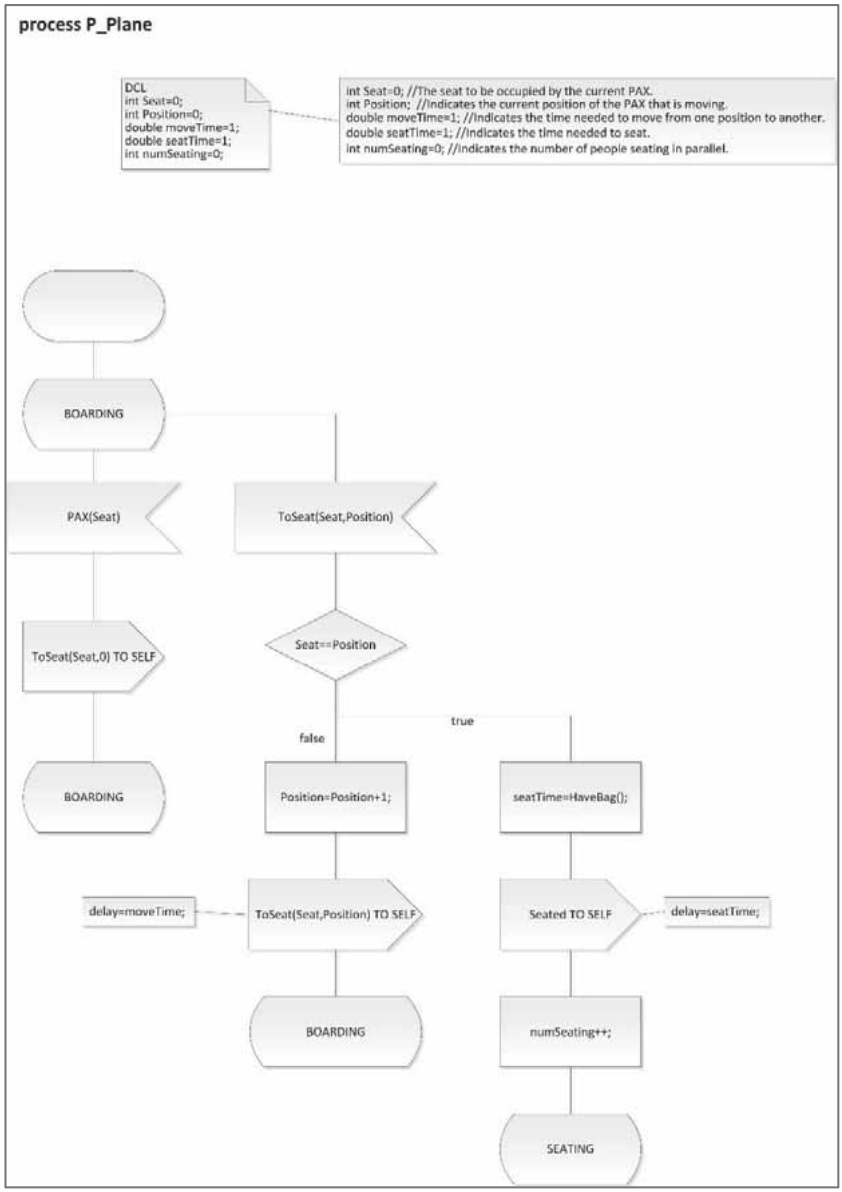


Figure 3: *P_Plane BOARDING state*

The model takes care of the movement of the passengers inside the plane and the possible queues due to the limited space inside the cabin. *P_Plane* represents the movement of the passengers inside the plane to reach its final seat. Each passenger has a final position and needs a time to reach this position. Also, this movement can be delayed due to the interference with other passengers. The time needed to seat, obtained from the PROCEDURE *HaveBag* takes care if other passengers exists in the

row. In that case the delay needed to seat increases. Also this PROCEDURE analyses if is needed more time to store carry-on luggage.

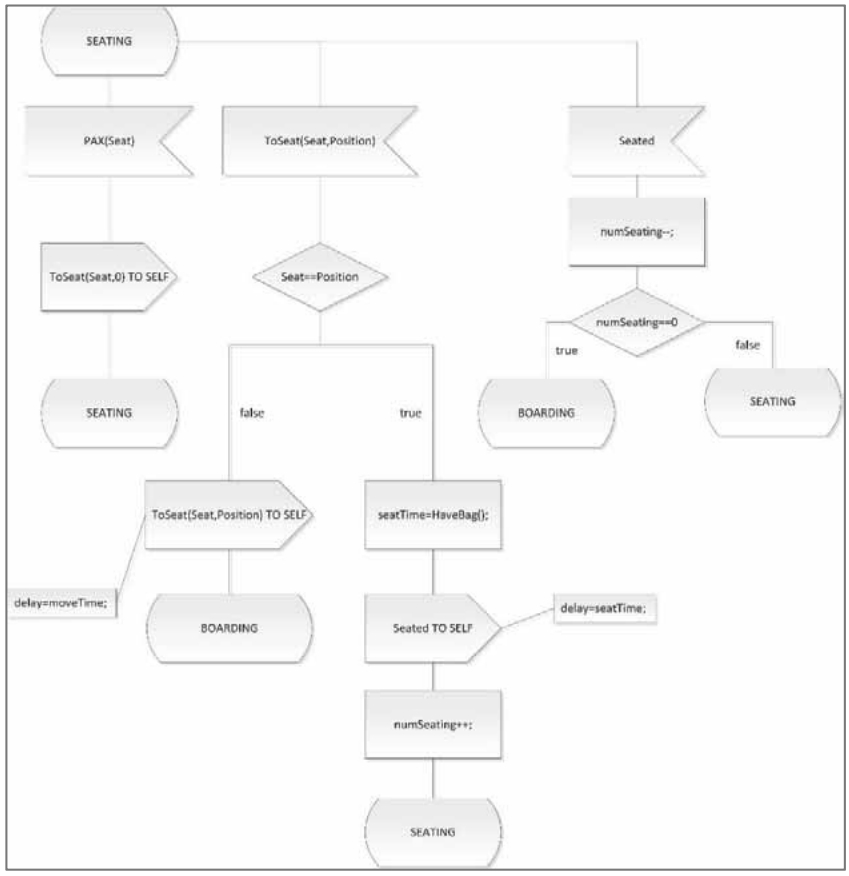


Figure 4: *P_Plane SEATING state*

P_Plane owns two states, BOARDING and SEATING. On BOARDING state the passengers are in movement, to reach its final position, on SEATING state the passengers are waiting until all the passengers that are in the position are seated.

4 Numerical Experiments

In this article, three boarding strategies are tested (Random, Back-to-Front, and Front-To-Back).

We have only considered airplanes with one single aisle in the center, and three seats in each size of this aisle. These three specific types of airplanes correspond to mid-sized airplanes. We have not considered small nor large airplanes because, since they have a different configuration of seats, we would have had to change the model layout.

As a medium-small commercial airplane, we have considered an Airbus A320 (see Figure 5), which allows a total of 152 passengers (8 in first class and 144 in economy class); secondly, a Boeing B757-200 (see Figure 6) with capacity of 178 passengers (16 in first class and 162 in economy class) has been used as a medium airplane; finally, as a medium-large aircraft we have considered a Tupolev Tu-214 (see Figure 7) that allows a maximum of 212 passengers (32 in first class and 180 in economy class).

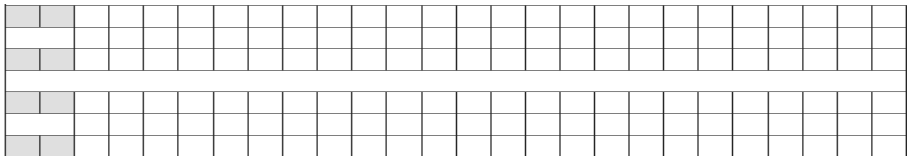


Figure 5: *Medium-small airplanes (Airbus A320). Configuration 8/144, first class: 2 rows * 4 seats and economy class: 24 rows * 6 seats.*

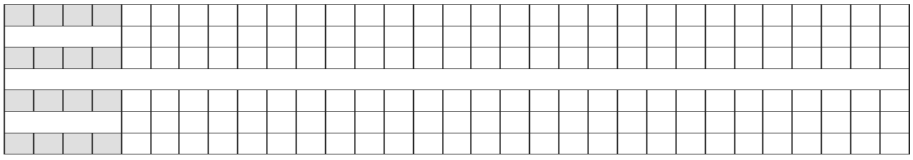


Figure 6: *Medium airplanes (Boeing B757-200). Configuration: 16/162, first class: 4 rows * 4 seats, economy class: 27 rows * 6 seats.*

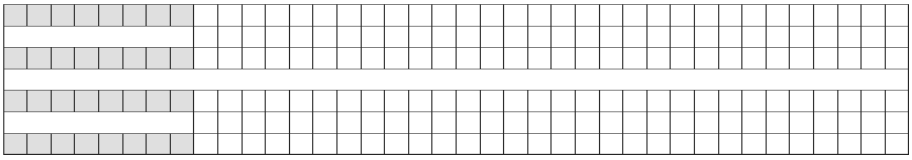


Figure 7: *Medium-large airplanes (Tupolev Tu-214). Configuration: 32/180, first class: 8 rows * 4 seats, economy class: 30 rows * 6 seats.*

Also according to the occupancy level, our model has considered two different specific scenarios to study within each aircraft classification:

Medium-small airplanes (Airbus A320: 152 passengers):

- medium occupancy level: 76 passengers (4/72)
- high occupancy level: 152 passengers (8/144)

Medium airplanes (178 passengers: Boeing B757-200):

- medium occupancy level: 89 passengers (8/81)
- high occupancy level: 178 passengers (16/162)

Medium-large airplanes (212 passengers: Tupolev Tu-214):

- medium occupancy level: 106 passengers (16/90)
- high occupancy level: 212 passengers (32/180)

The model assumes some other parameters as a constants:

- Walking time per row = 1 time unit (0.5 seconds)
- Seating time interference = 10 time unit (5 seconds)
- Baggage stowage time = 12 time unit (6 seconds)

In each scenario 30 iterations have been computed to test its robustness. Because of the quantity of information extracted from each scenario, a sample has been chosen. An Analysis of Variance (ANOVA) for the scenario Medium–Large aircrafts with Medium Occupancy level has been done. The results from this ANOVA tests (p-value = 0.000 and non-overlapping confidence intervals) allow us to conclude that there exist significant differences in average boarding times among the different boarding policies considered.

Table 1 summarizes the results associated to the 18 different scenarios considered. Figure 8 and Figure 9 shows the box-plots for the medium-large airplanes (Tupolev Tu-214) for medium and high occupancy.

Table 1: *Summary Results. On the model BtF and FtB random appears mainly because the passengers in each row can be situated following different ordination patterns, that means not always the first person that arrive to the row is who must be seated on the window seat.*

	Medium-Small Aircraft			
	Random	BtF	FtB	nIterations
Medium Occupancy Level	495.8	565.1	747.1	30
High Occupancy Level	1008.5	1330.9	1522.7	30
	Medium Aircraft			
	Random	BtF	FtB	
Medium Occupancy Level	574.1	654.4	855.7	30
High Occupancy Level	1140.8	1517.9	1746.2	30
	Medium-Large Aircraft			
	Random	BtF	FtB	
Medium Occupancy Level	663.1	754.5	957.6	30
High Occupancy Level	1314.3	1707.8	1934.1	30

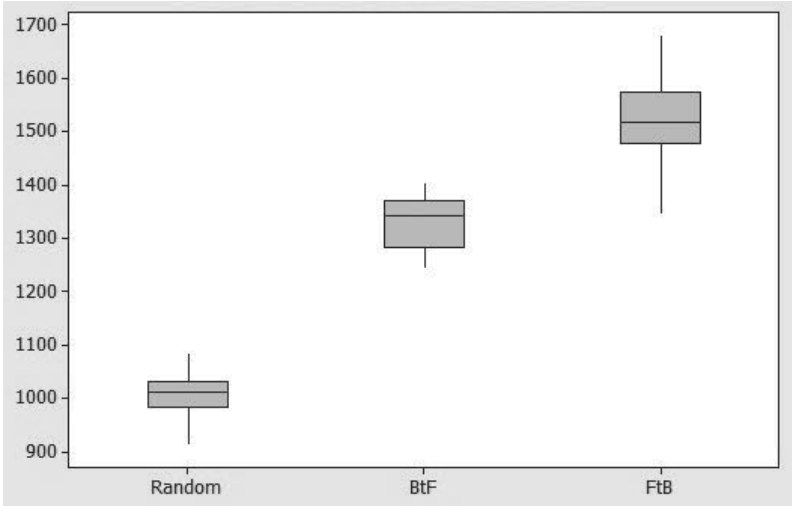


Figure 8: *Box-plot for high occupancy level (100%). Medium-large airplanes (Tupolev Tu-214).*

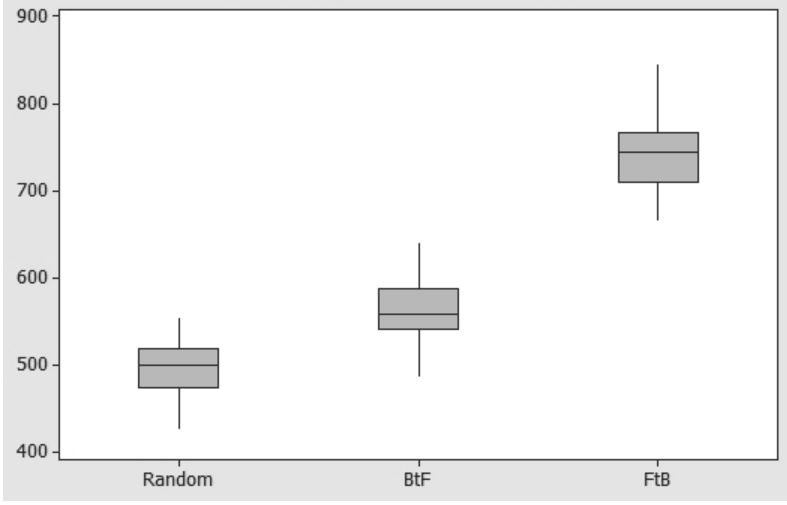


Figure 9: *Box-plot for medium occupancy level (100%). Medium-large airplanes (Tupolev Tu-214).*

5 Concluding remarks

In this study we analyse only the case of boarding passengers through the bridge, without considering the case where aircrafts park at a remote stand. This implies that the passengers are emplaned using one single door. Also, in the considerations used in this study, we analyse only planes with one aisle in the center, and three seats in each side off the aisle, with the category of mid-size planes.

Our results seem to confirm that the traditional back-to-front approach is not the most efficient one. In contrast, the random boarding strategy seems to perform the best in all scenarios. Some studies suggested that airline managers should apply a certain boarding method according to the airplane size, or the occupancy of the flight and aircraft size. However, basing on our simulations, the random method must be seriously considered to be used by airlines. Also, as observed proved in our simulation study, as well as in some studies analysed in the literature review, the passenger occupancy level becomes a very important factor. The results of the simulation show how the time difference between boarding methods increases as the occupancy level raises.

Other contribution of this paper is the simplicity of the model and its usability through the Excel that implements the model.

For future work it would be desirable to real-life data representing uncertainty in the system by using some probability distributions, e.g. statistical distributions (i.e. Weibull, or LogNormal. Gamma, Normal) to test possible behaviours. A more accurate model could consider airplanes with for seats per row and one single aisle, as well as large airplanes with two different aisle. Thereby, passengers were enplaned using one single door. The airplane used for the simulation took under consideration those with one single aisle in the center and three seats in each size of this aisle. These types of aircrafts are classified in the category of mid-sized airplanes. Therefore, in this paper, we have presented a simulation-based approach for solving the boarding process problem.

References

Bauer, M., Bhawalkar, K., & Edwards, M. (2007). Boarding at the Speed of Flight. *UMAP Journal*.

ITU-T. (2012). *Specification and Description Language (SDL).* Retrieved 02 06, 2013, from Series Z: Languages and general software aspects for telecommunication systems.: http://www.itu.int/rec/T-REC-Z.100/en

Marelli, S., Mattocks, G., & Merry, R. (1998). The role of computer simulation in reducing airplane turn time. *AERO Magazine, 1*.

Van den Briel, M., Villalobos, J., Hogg, G., Lindemann, T., & Mule, V. (2005). America West airlines develops efficient boarding strategies. *Interfaces, 35*, 191-201.

Van Landeghem, H., & Beuselinck, A. (2002). Reducing passenger boarding time in airplanes. *European Journal of Operational Research, 142*(2).

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Einlastung von Montageaufträgen: Von der Simulation zur Integration in das operative Planungssystem der Fa. Nobilia

Dispatching of assembly orders: From a simulation study to the integration into the operative planning system at Nobilia

Hermann Köhne, Nobilia-Werke J. Stickling GmbH & Co. KG, Verl (Germany),
hermann_koehne@nobilia.de

Kai Gutenschwager, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften,
Wolfenbüttel (Germany) und SimPlan AG, Braunschweig (Germany),
k.gutenschwager@ostfalia.de

Abstract: In this paper we present a case study dealing with the dispatching of assembly orders at Nobilia, a German kitchen manufacturer. As the production quantity has increased significantly over the last years, the assembly had become a serious bottleneck. In order to increase the production throughput and avoid bottlenecks in the assembly lines a new dispatching approach has been developed, characterized by changing the general approach to a pull-system and the optimization of the order sequence of tours. Both changes were analyzed and further improved within a simulation study. Finally, the new approaches were integrated into the operative planning system at Nobilia, as the simulation study showed improvement potentials of the production productivity of about 10%.

1 Einleitung

Mit einem Umsatz von 897,9 Millionen Euro und einer Mitarbeiterzahl von 2.446 im Jahre 2012 ist die Firma Nobilia in Deutschland der größte Küchenmöbelproduzent. An zwei deutschen Standorten werden pro Tag ca. 2.600 komplette Küchen mit insgesamt 26.000 Typen (Schränken) gefertigt. Dazu werden 5.000 Elektrogeräte (JIT) zur Kommission ausgeliefert. Die Firma Nobilia besitzt einen eigenen Fuhrpark mit 145 LKW und 500 Aufliegern. Das Frachtvolumen beträgt 2.135.000 m³/Jahr.

Im Zuge des enormen Wachstums der letzen Jahre zeigten sich Probleme bei der Abarbeitung der Produktionsmenge eines Tages. Obwohl die Gesamtzahl der eingelasteten Schranktypen die vorgegebenen Grenzwerte nicht überschritten, konnte die geforderte Anzahl oft nicht in der geplanten Tagesarbeitszeit gefertigt werden. Überstunden und Terminschwierigkeiten waren die Folge. Zur

Untersuchung und Behebung dieser Problematik wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, die sich mit der Optimierung der Einlastungsstrategie und der Reihenfolgeplanung von Fertigungsaufträgen beschäftigte.

Die Problemstellung wird im folgenden Abschnitt näher beschrieben, um dann die im Rahmen einer Simulationsstudie entwickelten Steuerungsansätze vorzustellen und anschließend ihre Überführung in den operativen Betrieb zu thematisieren. Der Artikel endet mit einem kurzen Fazit und Ausblick auf weitere Entwicklungen.

2 Problemstellung

Art und Umfang der Produktion eines Tages wird bei Fa. Nobilia durch die Fuhrparkdisposition vorgegeben. Die Planungseinheit ist dabei die Tour, die der Ladung eines Aufliegers oder eines Containers entspricht, bestehend aus kompletten Küchenkommissionen und Einzelteilen. In der Fuhrparkdisposition wird für den Umfang der Produktion des zu planenden Tages als Obergrenze generell die Fertigungskapazität an Schranktypen berücksichtigt. Unterhalb dieser Schwelle werden alle zu fertigenden Artikel als gleichartig betrachtet. Weitere Einschränkungen bezüglich der Fertigungskapazität einzelner Artikel werden in der Regel bei der Planung der einzelnen Touren nicht betrachtet. Die auf diese Weise geplante Tagesproduktion wird an die Fertigung mit vier Tagen Vorlauf übergeben.

Auf den für die einzelnen Produktlinien (Hochschränke, Unterschränke und Wandschränke) vorgesehenen Montagebändern können prinzipiell alle Schranktypen aus dem Produktspektrum gefertigt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungen der Schranktypen variiert der Durchsatz allerdings in Abhängigkeit von der Produktionszeit für die einzelnen Schränke. Bei der Einlastung der Tagesproduktionsmenge werden diese Unterschiede aber nicht berücksichtigt. Typischerweise kommt es daher zu Verschiebungen bei der Fertigung der Schranktypen der einzelnen Touren auf den Montagebändern.

Nachdem die Fertigung abgeschlossen ist, werden die Typen der einzelnen Montagebänder dem Zieltor der Tour zugeführt. Jedes Verladetor ist dabei an einen Unterflurförderer angeschlossen. Der Unterflurförderer dient gleichzeitig als Sortierkreisel. Schematisch ist die Verladezone und der jeweils zugeordnete Kommissionierbereich in Abbildung 1 eingezeichnet. Da die Verladezone (pro Tor eine Fläche) im Prinzip den einzigen Puffer in der Schrankproduktion darstellt, führt eine Verzögerung bei der Fertigstellung einer Tour oftmals zu einer Behinderung der Schrankproduktion, im schlimmsten Fall zum Stillstand der Montage. Das Ziel der Einlastung muss demnach darin bestehen, Touren möglichst zusammenhängend zu produzieren, damit die entsprechende Verladezone möglich kurz belegt wird und für weitere Aufträge zur Verfügung steht.

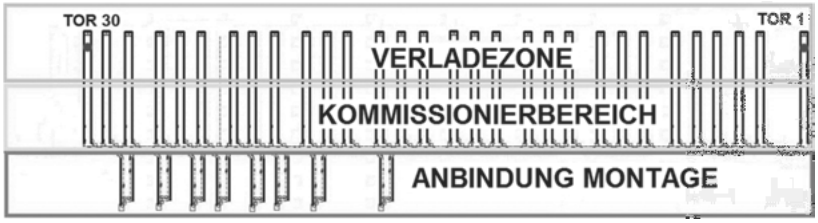


Abbildung 1: *Anbindung der Montagelinien an den Versandbereich (Tore)*

Der ursprüngliche Steuerungsansatz sieht eine Zuordnung von Touren zu sogenannten Freigaben im Sinne einer Batch-Bildung vor, wobei Touren vorab auch den Versandtoren zugeordnet werden. Alle Fertigungsaufträge einer Auftragsfreigabe werden gleichzeitig freigegeben, wenn die Aufträge der vorangegangen Freigabe nahezu vollständig abgearbeitet sind. Damit soll sichergestellt werden, dass für jedes erste Holzteil einer Tour, das die Montagelinie durchlaufen hat, auch ein Tor zugeordnet werden kann und somit Stillstands-Situationen für die Montagebänder nahezu ausgeschlossen werden.

Mit diesem Ansatz kann allerdings keine gleichmäßig hohe Auslastung der Versandflächen an den Toren erreicht werden. Damit einher gehen Verluste bezüglich des Durchsatzes der Montage. Da die Produktionsmengen in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen sind, wurde die Montage schließlich zu einem Engpass, der zunächst durch zusätzliche Schichten abgefangen wurde. Gleichzeitig beschäftigte sich die Firma Nobilia aber auch mit Möglichkeiten, die Leistung der Montage signifikant zu verbessern. Ein möglicher Ansatz wurde in der Umstellung auf ein Pull-System gesehen, wobei die Verladezone das ziehende Element ist: Sobald eine Verladefläche frei ist, wird die nächste noch nicht zugeordnete Tour, deren erste Holzteile die Montage durchlaufen haben, gezogen; vgl. Günther und Tempelmeier (2012) zu einer Übersicht unterschiedlicher Steuerungsansätze. Mit diesem Ansatz verbunden stellt sich zudem die Frage nach einer optimalen Einlastungsreihenfolge der Touren, so dass der Durchsatz maximiert wird. Mit beiden Problemstellungen beschäftigte sich eine Optimierungs- und Simulationsstudie. Diese wird im folgenden Abschnitt näher vorgestellt. Die hier entwickelten Verfahren wurden anschließend in die operative Steuerung übernommen. Die entsprechende Überführung wird abschließend thematisiert.

3 Simulationsgestützte Entwicklung eines neuen Planungskonzepts

In diesem Abschnitt gehen wir auf eine Simulationsstudie ein, die zum Ziel hatte, eine neue Planungslogik für die Einlastung von Aufträgen für die Montagebänder zu entwerfen und Potentiale zur Erhöhung des Durchsatzes auszuweisen. Die Studie gliederte sich in zwei Teile. Zunächst wurde ein Grobmodell der Anlage entworfen, um den bisherigen Steuerungsansatz mit einer zu entwickelnden Pull-Steuerung zu vergleichen. Anschließend wurde für das Reihenfolgeproblem der Einlastung der Touren ein Optimierungsverfahren auf Basis von Tabu Search entwickelt.

3.1 Simulative Bewertung der Einführung eines Pull-Ansatzes für die Zuordnung von Touren zu Versandflächen

Basis für das Simulationsmodell, das von der Simplan AG unter *Tecnomatix Plant Simulation* der Fa. Siemens (vgl. Bangsow 2011) entwickelt wurde, sind die 13 Montagebänder des Werks 1 und die Zuordnung der darauf zu fertigenden Schranktypen. Montagebänder für das gleiche Artikelspektrum sind zu acht Bandgruppen zusammengefasst. Zur Vereinfachung des Modells wurde als Kapazitätsgrenzen für die Bandgruppen die Produktionsleistung über alle Schranktypen pro Stunde eingesetzt.

In Abbildung 2 ist das Modell dargestellt. Es besteht aus den Modulen der *Verplanung* (Sequenzbildung), der *Torverwaltung* sowie den Bandgruppen und 33 Toren mit der jeweiligen Belegung. Die Teile, die der Montage (in der Quelle) angedient werden, kommen in Wagen aus der vorgelagerten Produktionsstufe.

Die (vereinfacht abgebildete) Wagenbildung ist Teil des Modells. Basis dieses ersten Planungsschritts stellt das gesamte Produktionsprogramm eines Tages dar, das (zum Zeitpunkt der Studie) typischerweise 17.000 bis 18.000 Positionen umfasste. Die entsprechende Liste beinhaltet Angaben zur Holztypnummer, Typenklasse, Freigabe, Tour, Tor (für einige Touren ist dieses bereits vorab fixiert) sowie zum Band. Durch eine gegebene Zuordnung von Bändern zu Bandgruppen wird zunächst die Bandgruppe bestimmt. Anschließend wird aus den Eingangsdaten eine Tourliste abgeleitet, die nach gegebener Freigabe und Tournummer sortiert wird. Diese Liste stellt die grundsätzliche Sequenz dar, in der die Touren eingelastet werden sollen und nach der die Wagen der Vorstufe beladen werden. Gemäß der Toursequenz werden die Holzteile einer Bandgruppe-Typenklasse-Kombination sukzessive Wagen zugeordnet, wobei die Kapazität der Wagen einzuhalten ist. Die Holzteile einer Tour, die auf der gleichen Bandgruppe gefertigt werden, können sich dabei über mehrere Wagen verteilen.

Um die Gefahr von Stillstandsituationen zu minimieren, gibt es in der ursprünglichen Wagenbildung eine Begrenzung für die Anzahl der pro Wagen zulässigen Touren. Damit ergeben sich im Ergebnis neben voll beladenen Wagen auch viele sogenannte Anbruch-Wagen, die nicht voll ausgelastet sind. Diese Begrenzung, die über die Freigabezuordnung umgesetzt wird, führt somit auch zu Verringerung des Durchsatzes der Produktion. Durch den neuen Steuerungsansatz sollte diese Begrenzung aufgehoben werden und die Auslastung der Wagen und damit der Durchsatz der Produktion erhöht werden.

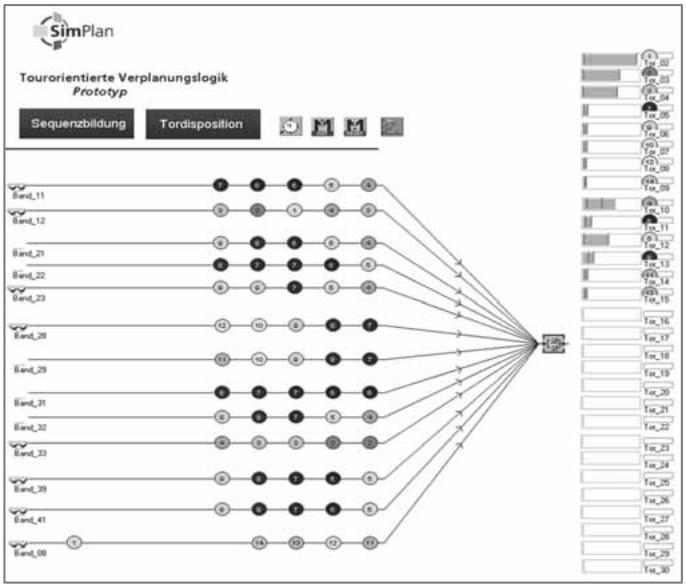


Abbildung 2: *Simulationsmodell zur Bewertung der Umstellung auf ein Pull-System zur Auftragsfreigabe*

Diese Wagen werden im Simulationsmodell als bewegliche Elemente erzeugt und sukzessive in die Montage eingelastet. Die beweglichen Elemente des Modells stellen jeweils Teilaufträge dar, wobei alle Holzteile einer Tour eines Wagens, die auf der gleichen Bandgruppe zu fertigen sind, zu einem Element zusammengefasst sind. Die Bearbeitungszeit auf dem jeweiligen Band ergibt sich aus der Anzahl der Holzteile und der durchschnittlichen Bearbeitungszeit der zugehörigen Typenklasse, die in den Stammdaten gegeben sind.

Die Zuordnung zu Toren erfolgt im Modell an einer Parallelstation, die das tatsächliche Transportsystem (Unterflurförderer) zwischen Bändern und Toren grob abbildet. Die Entscheidungsregel an diesem Punkt sieht eine direkte Zuordnung für bestimmte Touren (z.B. Selbstabholer) vor. Wenn ansonsten bereits ein Tor für die Tour zugewiesen wurde, so ist die Zuordnung ebenfalls trivial. Ist hingegen noch kein Tor für die Tour gegeben (erstes fertiggestelltes Holzteil der Tour), so wird das (gemäß der Torliste) erste unbelegte Tor bzw. die entsprechende Kommissionierfläche zugeordnet.

Insbesondere für die neue Steuerungslogik kann aber der Fall eintreten, dass kein freies Tor (bzw. freie Kommissionierfläche) gegeben ist. Dies führt zunächst zu einem unmittelbaren Stop des Bandes, bis ein Tor wieder frei ist. Sobald die Kommissionierung einer anderen Tour beendet ist und die Pufferfläche vor dem Tor wieder frei ist, kann die Fläche erneut belegt werden. Bei Ende einer Kommissionierung wird für die neue Steuerung somit geprüft, ob bereits Holzteile einer Tour auf eine Torzuordnung warten. Ist dies der Fall, so wird die Zuordnungsregel für die Torzuordnung für die Tour mit kleinstem Reihenfolgeindex aller wartenden Touren erneut aufgerufen. Mit diesem Ansatz wird angestrebt, die Versandflächen möglichst kontinuierlich zu belegen.

Für den neuen Steuerungsansatz wurde ein Experiment zur Prüfung auf Deadlock-Situationen und zur Bestimmung der erwarteten Arbeitszeit für das Tagesprogramm durchgeführt. Basis bildeten die Auftragsdaten von 40 Produktionstagen. Mit dem Modell konnte festgestellt werden, dass tatsächlich Deadlock-Situationen auftreten, d.h. am Ende aller Bändergruppen warten Holzteile von Touren, für die kein Tor mehr zugeordnet werden kann und gleichzeitig ist keine Tour an den Toren abgeschlossen. Als mögliche Gründe für diese Deadlock-Situationen wurden zwei Gründe identifiziert:

- Bei der Wagenbildung entstehen Wagen, die zu viele Touren umfassen und somit auch entsprechend viele Tore parallel beanspruchen.
- Es erfolgt keine „Abriegelung“ bei der dynamischen Zuordnung von Touren zu Toren.

Die Wagenbildung wurde für den neuen Steuerungsansatz so geändert, dass keine Touren mehr zusammengefasst werden, die in der Toursequenz zu weit auseinander liegen. Als Lösungsansatz werden – nach Bandgruppen unterschieden – jeweils Gruppen von n_i Touren definiert, d.h. jede Tour ist pro Bandgruppe i einer Tourgruppe zugeordnet, was dem Konzept der ursprünglichen Freigaben nahekommt. Im Rahmen der Simulation wurden dann unterschiedliche Parameterkonfigurationen für die maximale Gruppengröße pro Bandgruppe untersucht.

Zur Vermeidung von Deadlock-Situationen wurde zudem die Strategie zur Zuordnung von Touren zu Toren modifiziert: Als Steuerungsparameter wurde eine maximale „Distanz“ *maxDistPos* zwischen den Reihenfolgeindizes von Touren, die parallel an den Toren bearbeitet werden dürfen, definiert: Für *maxDistPos* = 25 bedeutet dies beispielweise, dass für die Zuordnung der Tour, die an 28er Position der Lösungssequenz steht, zu einem Tor alle Touren bis zur dritten Position der Lösungsreihenfolge bereits die Montage vollständig verlassen haben müssen, ansonsten muss die Tour „warten“.

Im Ergebnis konnten mit diesen beiden Änderungen Deadlock-Situationen in der Simulation ausgeschlossen werden. Eine Senkung der Bearbeitungszeit zur Fertigstellung des gesamten Tagesproduktionsprogramms wurde anschließend im Zusammenhang mit der Optimierung der Einlastungsreihenfolge der Touren angestrebt.

3.2 Reihenfolgeplanung von Touren

Im zweiten Schritt wurde auf Basis des Simulationsmodells ein Optimierungsverfahren entworfen und implementiert, das sich mit der Reihenfolgeoptimierung der Touren beschäftigt. Touren sind im Sinne einer Glättung möglichst zusammenhängend auf allen Bändern zu fertigen, d.h. die Summe der Auftragsspanne (Zeit zwischen Startzeitpunkt der Produktion auf der „ersten“ Bandgruppe und dem Fertigstellungszeitpunkt auf der „letzten“ Bandgruppe) aller Touren ist zu minimieren.

Als Optimierungsverfahren ist Tabu Search, eine Meta-Heuristik, gewählt worden, die ein lokales Suchverfahren steuert; vgl. Domschke et al. (1997) sowie Glover und Laguna (1997) für eine Übersicht zu Tabu Search. Lokal ist ein Verbesserungsverfahren, wenn von einer bestimmten Lösung (Parametereinstellung) ausgegangen wird und regelbasiert nur jeweils eine einzelne Änderung der Parametereinstellung vornimmt. Eine solche Änderung definiert den Übergang zu

einer sogenannten Nachbarlösung. Über die Nachbarschaftsdefinition wird festgelegt, welche Nachbarn zu einer Lösung gehören bzw. erreichbar sind. Für Reihenfolgeprobleme sind typische Nachbarschaftsdefinitionen das Verschieben *(shift move)* oder der Tausch *(swap move)* von Elementen in der Lösungssequenz. Für das vorliegende Problem wurde das Verschieben von Touren in der Lösungssequenz als Nachbarschaftsdefinition gewählt. In jeder Iteration des Verfahrens wird jetzt jede Tour einmal betrachtet und die Position dieser Tour in der Sequenz systematisch verändert und jede sich dadurch ergebende Lösungssequenz bewertet. Die beste gefundene Nachbarlösung (über alle Touren) wird dann fixiert und als neue Ausgangslösung für die nächste Iteration gewählt. Das Verfahren terminiert, sobald keine Nachbarlösung mehr eine Verbesserung ergibt.

Die Bewertung einer Tourreihenfolge erfolgt über eine statische Berechnung der *Summe der zu erwartenden Auftragsspannen* aller Touren. Dabei werden die Touren gemäß der Toursequenz den Bändergruppen sukzessive zugeordnet und die jeweiligen Start- und Endtermine (gemäß der für die auf der jeweiligen Bandgruppe zu fertigenden Schranktypen zu erwartenden Bearbeitungszeit) bestimmt. Die Auftragsspanne einer Tour ergibt sich als Differenz von maximalem Endtermin und minimalem Starttermin (jeweils über alle Bandgruppen).

Da für Heuristiken nicht sichergestellt ist, dass das globale Optimum gefunden wird, können so genannte Meta-Heuristiken zum Einsatz kommen, die u.a. dazu dienen, lokale Optima im Suchverlauf zu überwinden. Für das lokale Verbesserungsverfahren bedeutet dies, dass auch Verschlechterungen der Lösungsgüte in Kauf genommen werden. Damit das Verfahren aber nicht zu bereits besuchten Lösungen zurückkehrt (und somit Zyklen entstehen), wird im Rahmen von Tabu Search ein Gedächtnis über die zuletzt besuchten Lösungen bzw. zuletzt durchgeführten Züge eingesetzt. Die Umkehrung dieser Züge, also z.B. die Verschiebung einer Tour an eine Position, an der sie in den letzten *n* Iterationen bereits war, ist dann tabu.

Bei der vorliegenden Problemstellung sind für die Bildung der Tourreihenfolge zudem Vorgaben der Fuhrparkdisposition zu berücksichtigten: Da für die Planer die Möglichkeit besteht, einige der Touren vorab innerhalb gewisser Bereiche (analog zu den ursprünglichen Freigaben) zu fixieren, müssen im Verfahren für jede Tour minimale und maximale Positionen in der Toursequenz berücksichtigt werden.

Es wurde nun simulativ untersucht, ob sich die Fertigungszeiten der Touren durch diesen Ansatz verbessern lassen. Basis bildeten die realen Auftragsdaten aus Werk 1. Für jeden untersuchten Produktionstag wurde die Ursprungsreihenfolge mit dem Ergebnis des Optimierungsverfahrens mit Hilfe des Simulationsmodells verglichen. Als Ergebnis der Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Produktionsleistung insgesamt durch eine bessere Einlastung der Touren eines Produktionstages die Gesamtleistung signifikant um bis zu 10% gesteigert werden konnte.

4 Inbetriebnahme

4.1 Von der Simulation in den operativen Betrieb – Werk 1

Auf Basis der in den Simulationsstudien gewonnen Erkenntnisse wurde beschlossen, die genutzten Methoden und Abläufe in das operative Geschäft zu integrieren. Um den neuen Planungsansatz im Betrieb nutzen zu können, waren

umfangreiche Arbeiten zu erledigen. Zur Durchführung wurden vier Arbeitsgruppen gebildet, die sich mit den Themen Verladung, der neuen Verplanungslogik, der Visualisierung des Produktionsstands sowie der Organisation in der Fabrik kümmerten.

In der Arbeitsgruppe *Verladung* wurde die Konsequenzen des neuen Planungsansatzes auf den Verladeprozess vor Ort geklärt. Als Lösung ist eine neue Verladesoftware entwickelt und eingeführt worden. Zu den Funktionen dieser neuen Software zählen die Abbildung der Beziehungen zwischen den gebildeten betrieblichen Touren und den Verladetoren sowie die dynamische Zuordnung der Tore zu den Touren.

In der Arbeitsgruppe *neue Verplanungslogik* ging es um die Integration des neuen Planungsansatzes in den allgemeinen Planungsprozess für einen Planungstag (Boxtag). Dieser Planungsprozess startet mit der Tourenbildung in der Fuhrparkdisposition und endet mit dem Laden der Fertigungsdaten in die Werksdatenbanken. Um im Tagesgeschäft von den Ergebnissen der Analyse profitieren zu können, mussten sowohl das Planungsmodell als auch das gewählte Verfahren in diesen Planungsprozess integriert werden. Das Optimierungsverfahren, das im Rahmen des Simulationsmodells implementiert wurde, wurde im Hause Nobilia in diesem ersten Projektdurchlauf softwaretechnisch mit einer Schnittstelle auf Flat File-Basis in den Gesamtplanungsprozess integriert, d.h. das unter *Plant Simulation* implementierte Optimierungsverfahren – und somit das Simulationswerkzeug selbst – wurde in den Planungsprozess direkt integriert. In der Arbeitsgruppe *neue Verplanungslogik* wurden neben dem Kernprozess der Verplanung auch die Abhängigkeiten zwischen den im Einsatz befindlichen EDV-Systemen betrachtet. Für Bereiche wie die Arbeitsplattenfertigung sind bei Nobilia Systeme im Einsatz, die Schnittplanoptimierungen vornehmen und die Anforderung der jeweils benötigten Rohplatten an die Hochregallager weitergeben. Diese Systeme und deren Schnittstellen waren ebenfalls an die neue Logik anzupassen, da die Rohplattenoptimierung die Auswahl der zu berücksichtigenden Arbeitsplatten anhand der Reihenfolge der zu fertigenden Kommissionen vornimmt.

Von der Umstellung auf die neue Verplanungslogik waren auch die Prozesse im Rahmen der JIT-Belieferung betroffen. Die Planung der Menge sowie die zeitliche Steuerung der Anlieferung basiert auf dem Schema der Freigaben. Um den Umstellungsaufwand hier gering zu halten, sind in der betrieblichen Planung aufeinanderfolgende Touren zu Gruppen zusammengefasst. Die Menge an Artikeln in einer solchen Gruppe, Tour-Range genannt, ist äquivalent zu denen der vorherigen Freigabe. Da die insgesamt vorgesehene Reihenfolge der Verladung abhängig von der vergebenen innerbetrieblichen Tour-Nummer war und die Verladegeschwindigkeit konstant blieb, konnte damit die Abwicklung der JIT-Anlieferung ohne größeren Aufwand vom Schema „Freigaben“ auf das Schema „Tour-Range“ umgestellt werden.

Die Arbeitsgruppe *Visualisierung des Produktionsstandes* beschäftigte sich mit den Folgen des neuen Planungsansatzes für die Feststellung der Terminsituation in der Fabrik. Für den ursprünglichen Planungsansatz gab es explizite Regeln, mit der die Terminsituation im Werk bestimmt werden konnte. Da diese auf den neuen Planungsansatz nicht mehr anwendbar waren, musste Ersatz in Form eines neuen, computergestützten Informationssystems geschaffen werden. Das für die neue

Lösung notwendige Reporting wurde mit Hilfe eines Data Warehouse-Ansatzes vom operativen Teil der Datenversorgung getrennt. Es ging unter der Bezeichnung „Fertigungsmonitor“ mit dem neuen Planungsansatz in Betrieb (s. Abb. 3).

Abbildung 3: *Visualisierung der dynamischen zugeordneten Tore zu den mit dem neuen Planungsansatz gebildeten Touren, rechte Spalte Tour, linke Spalte Tor. Die Einfärbungen dienen zur optischen Erkennung von kritischen Terminsituationen im Verladeverlauf*

In der Arbeitsgruppe *Organisation in der Fabrik* standen die Auswirkungen des neuen Planungsansatzes auf die Mitarbeiter im Vordergrund. Die Differenzen zwischen der alten und der neuen Logik wurden aufgezeigt. Für die neue Logik wurden Handlungsanweisungen erarbeitet und neue Hilfsmittel für die Mitarbeiter geschaffen. Dabei wurde in großem Maßstab auf den in der Arbeitsgruppe Visualisierung erarbeiteten Fertigungsmonitor zurückgegriffen. Von dieser Arbeitsgruppe wurden auch die Schulungen für die Mitarbeiter vorbereitet und durchgeführt.

Vom Zeitpunkt der Entscheidung, den neuen Planungsansatz einzuführen, bis zur Inbetriebnahme in Werk 1 vergingen sechs Monate. Nach Realisierung der erforderlichen Programme und Funktionen wurden einzelne Planungstage mit dem neuen Planungsansatz „nachgefahren“ und die Ergebnisse mit denen des alten Planungsansatzes verglichen. Dieser Vergleich diente dazu, die Funktionsfähigkeit insgesamt zu prüfen und zu kontrollieren. Nachdem diese Tests positiv verlaufen waren, wurde die Planung komplett umgestellt und die Lösung insgesamt in allen Bereichen zu einem Stichtag erfolgreich in Betrieb genommen.

4.2 Migration der neuen Optimierungslösung – Werk 2

Im Jahre 2006 ist Werk 2 in Betrieb genommen worden. Hier wurden die Planungsansätze von Werk 1 übernommen. Somit kam von Anfang an das Pull-Verfahren zum Einsatz. Auf die Auftragsreihenfolgeoptimierung der Touren wurde bei der Inbetriebnahme aber zunächst verzichtet. Der Grund dafür lag in der geringen Produktionsmenge von 2600 Schränken pro Tag mit einer Schicht zu Beginn der Fertigung im Jahr 2006.

Die Produktionsmenge ist allerdings weiterhin kontinuierlich gesteigert worden. Als diese im Jahre 2012 die Menge von 8000 Schränken pro Tag in zwei Schichten überschritt, wurden ähnliche Effekte wie zu Beginn des Projekts in Werk 1 festgestellt. Durch eine ungleiche Verteilung der Schranktypen über den Produktionstag kam es zu Schwankungen im Durchsatz pro Stunde. Darauf folgten Effekte wie Verzögerungen bei der Verladung, da Touren nicht abgeschlossen werden konnten.

Zur Lösung wurde beschlossen, das Verfahren für die Glättung des Produktionsprogramms aus Werk 1 auch auf die Touren in Werk 2 anzuwenden. In der Simulation konnte gezeigt werden, dass durch eine Glättung die durchschnittliche Durchlaufzeit der eingelasteten Touren sich auch in Werk 2 deutlich verbessern lässt.

Das Optimierungsverfahren, das zunächst im Rahmen der Simulationssoftware implementiert wurde, wurde im Hause Nobilia in diesem Schritt softwaretechnisch auf einer Oracle Datenbank migriert, auf der auch alle übrigen Programme und Funktionen des Gesamtplanungsprozesses in Oracle PL/SQL ablaufen. Eine vor allem robuste Integration ohne Systembrüche ist hier von wesentlicher Bedeutung, da die zentralen Routinen der Verplanung in der Nacht ablaufen und eine operative Begleitung der Verarbeitungsjobs aufgrund des hohen personellen Aufwands nicht ohne weiteres möglich ist. Die Migration ist durch einen internen Entwickler in drei Wochen realisiert worden. Vor der Inbetriebnahme wurde über einen Zeitraum von vier Wochen im Parallelbetrieb täglich die aus der Optimierung stammende Tourenreihenfolge mit der aus dem Produktivsystem stammenden Reihenfolge verglichen. Das Ergebnis wurde auf den Grad der Verbesserung und die korrekte Einordnung der durch die Fuhrparkdisposition fixierten Touren untersucht. Nach dem positiven Verlauf des Parallelbetriebs ist die Lösung für Werk 2 in den Produktivbetrieb gegangen. Die zusätzliche Verarbeitungszeit der Planungssysteme liegt zurzeit bei 12 Minuten für einen Planungstag.

5 Fazit

Mit einer Simulationsstudie wurde eine neue Verplanungslogik auf Basis von Tabu Search entwickelt und auf seine Verbesserungspotentiale hin bewertet. Die Produktionsleistung kann durch die neue Einlastung der Touren um bis zu 10% gesteigert werden. Aufgrund des positiven Ergebnisses der Studie entstand eine neue Optimierungslösung. Diese ist zuerst im Werk 1 2005 vollständig in Betrieb genommen worden. Nach der Einführungsphase war es möglich, den Durchsatz, gemessen an produzierten Schränken pro Stunde, im Durchschnitt von 980 auf 1080 zu erhöhen. Damit sind die in den Untersuchungen festgestellten möglichen Optimierungsergebnisse auch in der betrieblichen Praxis verwirklicht worden. Diese Produktionssteigerung gelang ohne zusätzlichen Einsatz von Personal und Maschinen.

In Werk 2 ist die Einführung im Jahre 2012 mit der beschriebenen Migration der Optimierungskomponente abgeschlossen worden. Da die grundlegenden Verfahren der Optimierungslösung in Werk 2 schon während der Inbetriebnahme im Jahre 2006 genutzt wurden, war der Effekt hier gemessen an der Zahl Schränke pro

Stunde nicht signifikant. Insgesamt ist hier eine Verbesserung des Durchsatzes durch die Vermeidung von Engpasssituationen auf den Montagebändern erzielt worden. Bezogen auf die Initiale Verteilung der Touren in Werk 2 beträgt die Verbesserung im Durchschnitt 8% (Berechnung auf Basis der Produktionszahlen Nobilia). Die in Oracle PL/SQL migrierte Optimierungslösung selbst wurde nach der erfolgreichen Einführung im Werk 2 auch für Werk 1 übernommen. Das Optimierungsergebnis könnte künftig noch wesentlich besser werden, wenn die Anzahl der von der Fuhrparkdisposition fixierten Touren verringert wird.

Literatur

Bangsow. S.: Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk. München: Hanser 2011.

Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S. (1997): Produktionsplanung: Ablauf-organisatorische Aspekte. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1997.

Glover, F.; Laguna, M.: Tabu Search. Boston: Kluwer 1997.

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

SpeedDeBlock – ein allgemeines generisches Blockade-Management System

SpeedDeBlock - an universal generic blockation management system

Karsten Wendt, Reik Zettl, Heike Wilson, Dualis GmbH IT Solution, Dresden (Germany), kwendt@dualis-it.de, rzettl@dualis.it.de, hwilson@dualis-it.de

Abstract: Event-based simulation tools and projects are often faced with the problem to handle upcoming blockations properly. This means, a certain number of elements reclaim under certain conditions the allocation of a subset of resources (other elements), often challenging among themselves. Typically a lot of programming capacities are bound to solve tasks like to check the conditions to decide when and which elements are allowed to allocate, notify them, managing queues and so on. Hereby we demonstrate a novel blockation handling system, which on one hand covers the most common blocking situations (from 1-1 blockations to n-m with FIFO queue blockations) and on the other hand provides interfaces to implement new types of blockation handling, sharing them among the entire simulation framework. To clarify the concept, illustrating examples are attached.

1 Einleitung

Zunächst werden in Abschnitt 1.1 und 1.2 die Motivation zur und die Abgrenzung der vorgestellten Arbeit dargelegt. Danach beschreibt Abschnitt 2 die Analyse der Problematik und zeigt den allgemeinen Lösungsansatz und dessen informelle Verarbeitung. Die Anwendung in einem komplexen Beispiel wird in Abschnitt 3 beschrieben. Abschließend erfolgt die Zusammenfassung und die Diskussion in 4.

1.1 Motivation

Ereignis-diskrete, objekt-orientierte Simulationen gewinnen heutzutage in immer mehr Bereichen an Bedeutung; mit großen und sehr großen Modellen werden komplexe Prozesse von der industriellen Fertigung bis zum Workflow großer Unternehmen abgebildet, validiert, überprüft und optimiert. Entscheidend für erfolgreiche Simulationsprojekte sind dabei weniger die bereits ausgereiften Simulationstechniken, sondern die Beherrschbarkeit, Validierung und Wiederverwendbarkeit der Modelle (Robinson 2005).

Bei der Umsetzung komplexer Prozessketten und –netzen sind Modellierer häufig mit Blockaden konfrontiert: Simulationsobjekte (SOs) allokieren unter bestimmten Bedingungen eine Teilmenge anderer SOs (Ressourcen). Schlägt die Allokation fehl, d.h. die Ressourcen sind bereits belegt, wechseln die betreffenden SOs in den Blockiert-Zustand und warten auf die erforderlichen Freigaben. Das Management solcher Situationen, d.h. Prüfen der Freigabe-Bedingungen, Verarbeiten konkurrierender und obsoleter Blockaden, Warteschlangen und das Benachrichtigen der blockierten SOs mit entsprechendem Kontext binden viel Kapazitäten, obwohl die Probleme oft ähnlich und verallgemeinerbar sind.

Mit *SpeedDeBlock* präsentieren wir ein allgemeines und erweiterbares Blockade-Management-System, welches die Blockade-Situationen abstrahiert, auf allgemeine Formen zurückführt, automatisch verarbeitet und somit die Validität, Wiederverwendbarkeit und Effizienz der Modell-Erstellung verbessert.

1.2 Abgrenzung

SpeedDeBlock ist ein Hilfsmittel, um wiederkehrende Modellierungssituationen in großen Modellen, wie exemplarisch aufgezeigt in Kleijnen (2005), effizient zu behandeln. Der allgemeine Ansatz der „Coupled Multicomponent Systems“ (Zeigler 2000) wird erweitert und gekapselt, sodass das Prüfen und Einplanen Blockade-relevanter Ereignisse entkoppelt vom eigentlichen Modell im Simulations-Framework eingebettet liegt. Es wird keine Optimierung hinsichtlich der Auflösung oder Vermeidung der Blockaden vorgenommen. Ohne Einschränkung des Modellierungsanspruchs wird dennoch eine verbesserte Analysierbarkeit der Abhängigkeiten im Modell erzielt (vgl. Venkatesh 2010).

2 Methoden und Verfahrensweisen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Analyse und Dekomposition von allgemeinen Blockade-Situationen erläutert (2.1). Abschnitte 2.2, 2.3 und 2.4 definieren die daraus abgeleiteten Modellierungselemente. Anhand eines Beispiels zeigt 2.5 die Verwendung der Elemente zum Anlegen und Auflösen von Blockaden, 2.6 beschreibt mögliche Element-Erweiterungen.

2.1 Blockade-Analyse

Ziel ist eine allgemeine Beschreibung von Blockade-Situationen, dazu werden unter 2.1.1 zunächst allgemeine Szenarios definiert. Abschnitt 2.1.2 zerlegt die Beschreibungen in ihre informellen Bestandteile.

2.1.1 Analyse allgemeiner Blockade-Szenarios

Zunächst wurden, ausgehend von einem blockierten Referenz-SO SO_r, folgende erschöpfenden Blockade-Situationen erstellt:

- *1:1* SO_r ist ohne Konkurrenz von einem einzelnen SO_b blockiert
- *1:M* SO_r ist ohne Konkurrenz von *M* SO_b blockiert
- *N:1* SO_r ist von einem einzelnen SO_b blockiert und konkurriert mit *(N-1)* SO_c um diese Ressource
- *N:M* SO_r ist von *M* SO_b blockiert und konkurriert mit *(N-1)* SO_c um (eine Untermenge) diese(r) Ressourcen

Abbildung 1 zeigt schematisch diese vier Situationen, welche die Grundlage für die weitere Analyse darstellen. Demnach kann eine Blockade durch ihre Auflöse-Anforderungsbeschreibung, die Maßnahmen nach ihrer Auflösung und die Behandlung von Konkurrenz definiert werden.

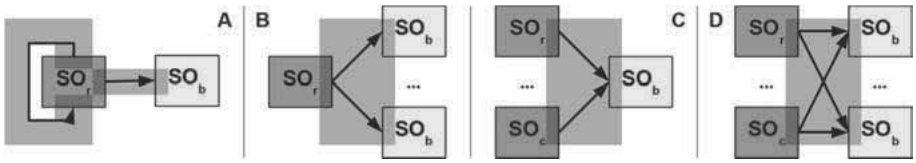


Abbildung 1: *Blockade-Szenarios; A: 1:1-Blockade (incl. Selbst-Blockade); B: 1:M-Blockade; C: N:1-Blockade; D: N:M-Blockade*

2.1.2 Blockade-Dekomposition

Basierend auf den Szenarios aus Abschnitt 2.1.1 wurde eine Blockade-Situation in ein *Requirement*, ein *Release-Handling* und die Zuordnung zu einer *Competition Group* zerlegt. Abbildung 2 zeigt die schematische Darstellung der Dekomposition. *Requirements* modellieren die Anforderungen zur Auslösung einer Blockade, *Release-Handlings* bilden den Vorgang beim Auslösen einer Blockade ab. Mehrere Blockaden integrierende *Competition Groups* lösen Konkurrenz unter wartenden SOs.

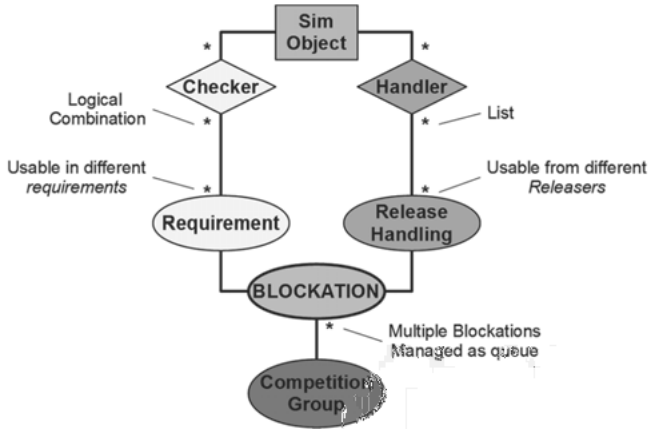


Abbildung 2: *Schematische Darstellung der Modellierung von Blockaden. Simulationsobjekte exportieren „Checker"- und „Handler"-Funktionen, die zum Überprüfen von Bedingungen zu Blockade-Auflösungen, bzw. zur Behandlungen von Blockade-Auflösungen genutzt werden. Die Checker werden in kombinatorischen Ausdrücken in Requirements gebündelt, die Handler als Liste in Release-Handlings. Requirement und Release-Handling beschreiben zusammen eine Blockade, die einer Competition Group zugewiesen wird. Eine Competition Group behandelt die Konkurrenz auslösbarer Blockaden.*

2.2 Requirements

Der folgende Abschnitt definiert des Modellierungselement *Requirement*, als Anforderungsbeschreibung zur Auflösung einer Blockade unter der Verwendung von *Checkern* (2.2.1 und 2.2.2). Abschnitt 2.2.3 beschreibt vordefinierte, häufig verwendete *Requirement*-Typen.

2.2.1 Checker-Delegaten

Die in Abschnitt 2.1.2 eingeführten *Checker*, oder *Checker*-Delegaten, sind Funktionen der Form

```
bool Check() (z.B. bool CanReceiveFlowObject())
```

und liefern eine Aussage darüber, ob eine singuläre Anforderung erfüllt ist.

2.2.2 Definition Requirement

Requirements beschreiben die Integration von mehreren *Checkern* C_i (siehe Abschnitt 2.2.1) als kombinatorischer Logik-Ausdruck der Form

$$R = A_0 \vee ... \vee A_n \;\; mit \;\; A = C_0 \wedge ... \wedge C_m \tag{1}$$

Ein *Requirement* gilt dann als erfüllt, wenn der logische Ausdruck wahr wird, z.B.:

$$R = Source.CanSend() \wedge Sink.Can\,\mathrm{Re}\,ceive() \tag{2}$$

2.2.3 Vordefinierte Requirement-Arten

SpeedDeBlock enthält unter Verwendung der Definition in Abschnitt 2.2.2 die in Abbildung 3 gezeigten vordefinierten *Requirement*-Typen zur Modellierung von Blockade-Anforderungen.

2.3 Release-Handling

Das Modellierungselement *Release-Handling* enthält die nötigen *Handler* (2.3.1) und Daten, welche im Falle der Blockade-Auflösung ausgelöst und verwendet werden (2.3.2).

2.3.1 Handler-Delegaten

Die in Abschnitt 2.1.2 eingeführten *Handler*, oder *Handler*-Delegaten, sind Funktionen der Form

```
void Handle(DataType ContextData) (z.B. void Send(Ptr Dest))
```

und bilden eine singuläre Aktion nach Auflösung einer Blockade ab.

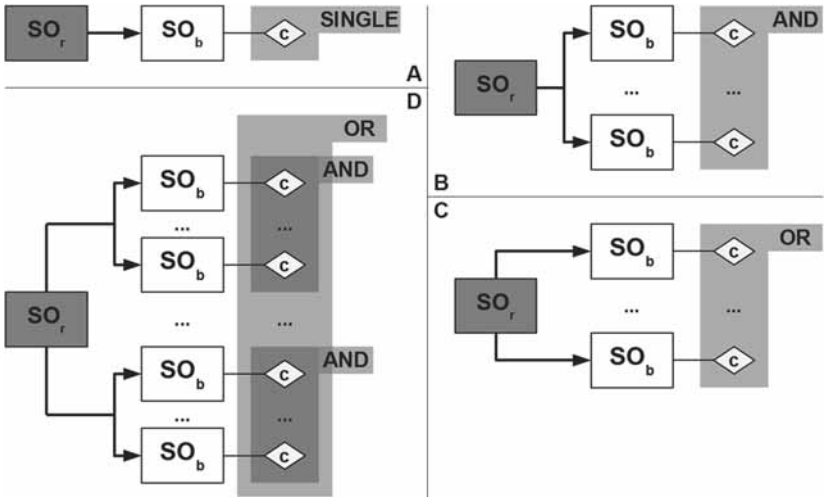


Abbildung 3: *Übersicht über vordefinierte Requirement Arten; A: Single-Req (d.h. Einzel-Checker muss wahr liefern); B: AND-Req. (d.h. alle Checker müssen wahr liefern); C: OR-Req. (d.h. mind. ein Checker muss wahr liefern); D: AND-OR-Req. (ODER-verknüpfte UND-Gruppen von Checkern)*

2.3.2 Definition Release-Handling

Das *Release-Handling* stellt eine Liste von *Handler*-Delegaten mit zugehörigen Kontext-Daten dar (s. Abs. 2.3.1), welche nach Blockade-Auflösung sequentiell aufgerufen werden.

2.4 Competition Groups

Zur Behandlung von Konkurrenz unter den wartenden SOs werden *Competition Groups* eingeführt (2.4.1) und häufig verwendete Typen erläutert (2.4.2).

2.4.1 Definition Competition Group

Während *Requirements* (s. 2.2) und *Release-Handlings* (siehe 2.3) nur im Kontext einer Blockade existieren, vereinen *Competition Groups* (siehe Einführung Abschnitt 2.1.2) mehrere konkurrierende Blockaden und lösen so das Reihenfolgeproblem bei mehrfach benötigten Ressourcen. *Competition Groups* bestehen aus einer Liste ihnen zugewiesener Blockaden (s. Abb. 2) und entscheiden gem. ihrer internen Logik, welche Blockade/n im Fall von mehreren auflösbaren Blockaden aufgelöst wird/werden.

2.4.2 Vordefinierte Competition Groups

SpeedDeBlock enthält unter Verwendung der Definition in Abschnitt 2.4.1 folgende vordefinierten *Competition Group*-Typen zur Modellierung von Blockade-Anforderungen:

- NONE: keine Konkurrenz-Behandlung; alle *Release-Handlings* werden ausgelöst
- FIFO: Warteschlange; das am längsten wartende *Release-Handling* wird ausgelöst

- LIFO: Stapel; das am kürzesten wartende *Release-Handling* wird ausgelöst
- PRIORITY: Warteschlange / Stapel mit Prioritäten; das am längsten / kürzesten wartende *Release-Handling* mit der höchsten Priorität wird ausgelöst

2.5 Modellierung

Im Folgenden werden das Anlegen, sowie das Auflösen einer Blockade in Konkurrenz mit Hilfe der definierten Elemente *Requirement*, *Release-Handling* und *Competition Group* (s. Abs. 2.2, 2.3 und 2.4) anhand eines vereinfachten Beispiels dargestellt (s. Abb. 4, schwarzer Rahmen). Ein Referenz-SO (SO_r) wartet auf benötigte Zustände zweier blockierender SOs (SO_b^0 und SO_b^1) und sich selbst. Zugleich konkurriert SO_r mit einem weiteres SO (SO_c) um eine der beiden Ressourcen SO_b^1. Abschnitt 2.5.1 beschreibt das Anlegen der Blockade, Abschnitt 0 das konkurrierende Freigeben.

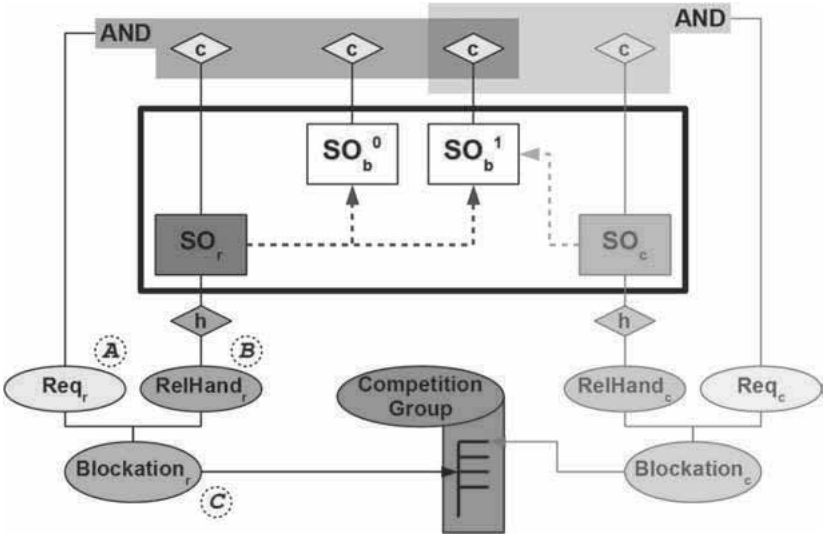


Abbildung 4: *Schematische Darstellung einer angelegten Blockade anhand eines vereinfachten Beispiels (blockiertes SO: SOr, blockierende SOs SOb0,1 und konkurrierendes SO SOc). A: Logische UND-Verknüpfung der Checker „c". B: Allokation des Release-Handlers „h".C: Anlegen der Blockade (blau) und Zuweisung zu einer Competition Group. Die Blockade des konkurrierenden Sim.-Obj. SOc ist bereits angelegt.*

2.5.1 Anlegen einer Blockade

Nach erfolgter Detektion einer Blockade werden die involvierten *Checker* „c" allokiert und als kombinatorische AND-Funktion in einem vordefinierten *Requirement* (s. Abs. 2.2.3) zusammengefasst (Abb. 4, A). Der aufzurufende *Handler* „h" von SO_r nach Auflösung der Blockade wird im *Release-Handling* ablegt (B). *Requirement* und *Release-Handling* bilden zusammen die Blockade,

welche abschließend in der *Competition Group* angemeldet wird (C). Algorithmus 1 zeigt eine mögliche Befehlsabfolge als Pseudo-Code.

Algorithmus 1:

```
Req_r         = new ANDReq(SO_r.CanSend, SO_b^0.CanReceive,
                SO_b^1.CanReceive)
RelHand_r     = new RelDataCol(SO_r.Send)
CompGrp       = AllocateCC(„FIFOCC“, Type=Fifo)
Blockation_r  = new Blockation(Req_r, RelHand_r, CompGrp)
```

2.5.2 Auflösen einer Blockade

Bei jeder Möglichkeit eine Blockade aufzulösen, rufen die SOs *Release()* auf. Das Framework übernimmt dann die Auswertung der betreffenden *Checker*, die Konkurrenzabwicklung in den *Competition Groups* und das Auslösen oder Einplanen der *Release-Handler*.

In Abbildung 5 löst SO_b^1 nach einer Zustandsänderung auf Verdacht *Release()* aus. *SpeedDeBlock* ermittelt alle involvierten Blockaden und prüft die *Checker* c der kombinatorischen *Requirements*. In diesem Beispiel liefern alle *Checker* c und somit alle AND-Gruppen wahr, sodass beide Blockaden $Blockation_r$ und $Blockation_c$ als auflösbar gelten. Die *Competition Group* (FIFO-Typ) verwertet diese Konkurrenzsituation und ermittelt $Blockation_c$ als ältere und somit aufzulösende Blockade. Mit dem Aufruf / Einplanen der *Release-Handler* h aus $RelHand_c$ und der Löschung der $Blockation_c$ ist der Auflösungsvorgang abgeschlossen.

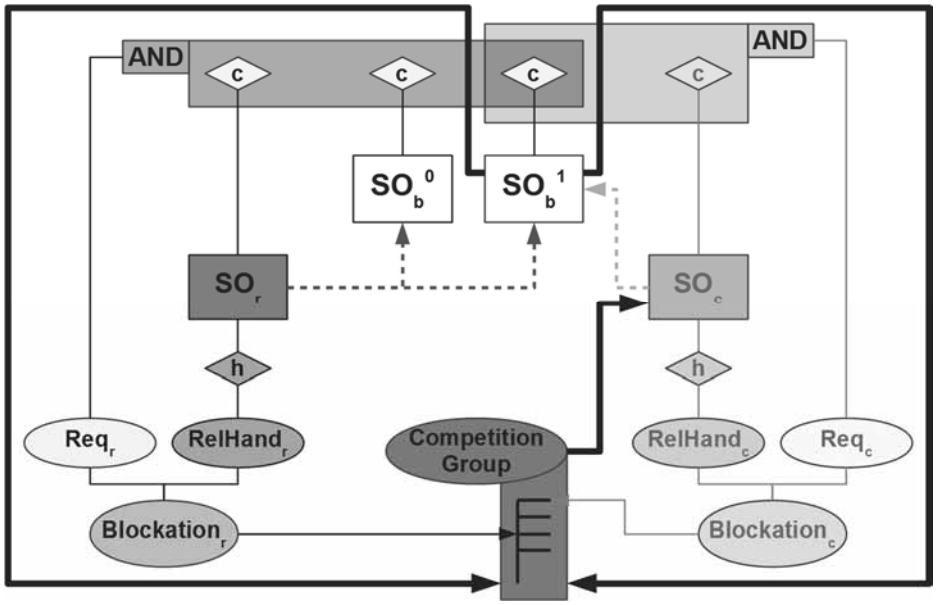


Abbildung 5: *Schematische Darstellung einer Blockade-Auflösung anhand eines vereinfachten Beispiels. Ausgehend von SOb1, verursacht Release() den Aufruf aller relvanten Checker c. In diesem Beispiel erweisen sich beide Blockaden als auflösbar. Die Competition Group der beiden auslösbaren Blockaden entscheidet über den Vorrang der beiden Blockaden. In diesem Fall ist es die ältere Blockationc, sodaß dessen Handler h aufgerufen wird.*

2.6 Erweiterbarkeit

Sowohl *Requirements* als auch *Competition Groups* sind als abstrakte Basis-Klassen definiert und lassen sich auf dieser Grundlage erweitern. Zu diesem Zweck muss jeweils die *Check()*-, bzw. die *PerformCompetition()*-Funktion überschrieben werden, um individuelle Verhaltensweisen anzulegen. So definierte *Requirement* und *Competition Groups* lassen sich wie aufgezeigt in der Modellierung verwenden (s. Abs. 2.5).

3 Ergebnisse

Dieser Abschnitt stellt zunächst in 3.1 die Anwendung von *SpeedDeBlock* in einem komplexen Beispiel dar. In 0 werden die Ergebnisse der vorgestellten Arbeit zusammengefasst.

3.1 Beispiel-Modellierung

In den folgenden beiden Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 werden die verwendeten SOs, sowie das genutzte Beispielmodell erläutert. 3.1.3 erläutert die Anwendung von *SpeedDeBlock* auf das Beispiel.

3.1.1 Simulationsobjekte

Die verwendeten SOs besitzen vier Zustände, welche sequentiell ineinander übergehen (s. Abb. 6). Im BUSY-Mode vergeht eine zufällig schwankende Zeitspanne bis zur Erstellung neuer Flussobjekte. Der READY-Mode beschreibt den Zustand der Sende-Bereitschaft der Flussobjekte. Nach dem Versenden wartet das SO im IDLE-Mode auf das Versenden eingehender Flussobjekte. Sind diese versandt, wird in den WAITING-Mode gewechselt. Weiterhin besitzen die SOs einen Input- und Output-Modus, welcher jeweils OR (von/zu irgendeinem Sender/Empfänger) oder AND (von/zu allen Sendern/Empfängern). Die SOs sind untereinander mit Förderstrecken verbunden, die Flussobjekte mit konstanter Geschwindigkeit transportieren.

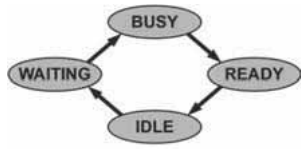


Abbildung 6: *Mögliche Zustände der SOs im Beispielmodell.*

3.1.2 Beispiel-Modell

Wie in Abbildung 7 gezeigt, besteht das Beispielmodell aus jeweils 3 Quellen, Prozessstationen und Senken, basierend auf den unter 3.1.1 beschriebenen SOs. Die mittlere Quelle arbeitet langsamer und beliefert alle Prozessstationen simultan (AND-Output-Modus) und muss daher priorisiert werden. Nach Verarbeitung in den Prozessstationen verschwinden die Flussobjekte in einer der drei Senken.

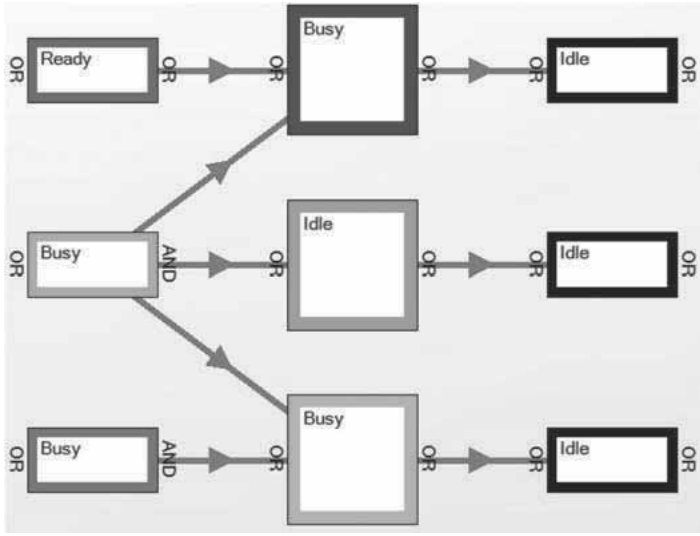


Abbildung 7: *Beispiel-Modell; Eine höher priorisierte Quelle (links, Mitte) prozessiert langsamer als die beiden anderen Quellen und muss an alle drei*

Prozessstationen (mittlere Spalte) gleichzeitig versenden. Zur Abbildung des Verhaltens werden Blockaden mit AND-Requirements (obere Quelle + obere Prozessstation, untere Quelle + untere Prozessstation, mittlere (priore) Quelle + alle Prozessstationen), siehe 2.2.3, verwendet und einer PRIORITY-Competition Group zugeordnet, siehe 2.4.2.

3.1.3 Verhaltensmodellierung mittels SpeedDeBlock

Algorithmus 2 (obere und untere Quelle) und 3 (mittlere Quelle) zeigen exemplarisch den Code-Aufwand zur Modellierung des unter 3.1.2 beschriebenen Verhaltens als Blockaden der Senken. Weiterhin wird bei jedem Zustandswechsels eines SOs in READY oder IDLE *Release()* von diesem aufgerufen, um verursachte Blockaden vom Framework auflösen zu lassen. Die Modellierung des restlichen (Blockade-unabhängigen) Verhaltens ist nicht aufgezeigt.

Algorithmus 2:

```
Req_ORSource =       new ANDReq(Source.CanSend, Target.CanReceive)
RelHand_ORSource =   new RelDataCol(Source.Send)
CompGrp =            Allocate(„PriorityGroup“, Type=Prio)
Block_ORSource =     new Blockation(Req_ORSource, RelHand_ORSource,
                     CompGrp, Priority = 0)
```

Algorithmus 3:

```
Req_ANDSource =      new ANDReq(Source.CanSend,
                     Target_0.CanReceive .. Target_1.CanReceive)
RelHand_ANDSource =  new RelDataCol(Source.Send)
CompGrp =            Allocate(„PriorityGroup“, Type=Prio)
Block_ANDSource =    new Blockation(Req_ANDSource, RelHand_ANDSource,
                     CompGrp, Priority = 1, PriorityCheck =
                     CanSend)
```

3.2 Zusammenfassung

Die Zerlegung in die allgemeine Modellierungselemente *Requirements*, *Release-Handlings* und *Competition Groups* (s. 2) eröffnet die Möglichkeit, Blockade-Situationen allgemein und kompakt zu modellieren. Die Auflösung geschieht automatisch und ohne weiteren Coding-Aufwand durch den Aufruf des Befehls *Release()* bei potentieller Auflösbarkeit.

In einem nicht-trivialen Beispiel (s. 3.1) konnte gezeigt werden, dass auch Blockierungen innerhalb komplexer Netze und Verhaltensweisen mittels *SpeedDeBlock* beherrschbar sind.

4 Diskussion

Im folgenden werden aufgetretene Probleme bei und mit der Arbeit des Blockade-Management-Systems (4.1), sowie Erweiterungsmöglichkeiten erläutert (4.2).

4.1 Probleme

Operative Schwierigkeiten ergeben sich bei der Umsetzung aufwendiger und großer Modelle aufgrund des hohen Abstraktionsgrades der Blockade-Modellierung. An dieser Stelle ist entweder längere Einarbeitung oder eine bessere Schnittstelle (API) notwendig. Weiterhin fehlt bisher der Nachweis der Allgemeingültigkeit des Ansatzes. Die Frage, ob sich jedes denkbare Szenario auf diese Weise abbilden lässt, ist aufgrund der hohen Komplexität schwierig.

4.2 Ausblick

Ausblickend kann zusammengefasst werden, dass das Framework zum einen zur statistischen Auswertung von Blockaden (Was von wem wie lange blockiert wurde) erweitert oder zum anderen zur Erstellung von generischem Verhalten (automatisiert erstellte Verhaltenslogik) oder zur vorrausschauenden Vermeidung von Deadlocks verwendet werden könnte.

Literatur

Kleijnen, J. P. C. et al.: Finding the Important Factors in Large-Scale Discrete-Event Simulations: Sequential Bifurcation and its Applications, CentER Discussion Paper (2003)

Robinson: Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next. Journal of the Operational Research Society (2005)

Venkatesh, S. et al.: Deadlock Detection and Resolution for Discrete Event Simulation: Multiple-Unit Seizes, College Station (2010)

Zeigler, B. P. et al.: Theory of Modeling and Simulation, Second Edition, Elsevier Service Academic Press, 2000

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess – Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau

Physics-based Simulation within the Engineering Process – Potentials for the Development of Assembly Systems in Automotive Industry

Benny Drescher, TU München, München (Germany), benny.drescher@iwb.tum.de
Peter Stich, Fraunhofer IWU, Augsburg (Germany), peter.stich@iwu.fraunhofer.de
Jens Kiefer, Anton Strahilov, Thomas Bär, Daimler AG, Ulm (Germany),
jens.kiefer@daimler.com, anton.strahilov@daimler.com, thomas.baer@daimler.com
Gunther Reinhart, TU München / Fraunhofer IWU,
München und Augsburg (Germany), gunther.reinhart@iwb.tum.de

Abstract: The paper outlines potentials for an application of physics-based simulation methods in order to improve the development of assembly systems within automotive industry. Therefore, today's characteristics of development processes including the perspective of an automotive manufacturer and its suppliers are visualized by process charts. A milestone-based overview describes current time and quality constraints. Furthermore, potential industry applications for mechatronics, especially physics-based simulation methods are deduced and discussed in four promising use-cases. The use-cases contribute to the integration and broader acceptance of simulation methods in automotive industry.

1 Motivation und Zielsetzung des Beitrages

Der Anteil an Steuerungskomponenten in Maschinen und Anlagen nimmt fortwährend zu. Die Anlagen der Zukunft zeichnen sich demnach durch ein mechatronisches Grundprinzip aus. Sie bestehen aus mechanischen Modulen zur Aufnahme von Kräften und Momenten, werden elektrisch angetrieben und durch komplexe informationstechnische Einheiten synchronisiert (Mensch und Mechatronik 2013). Dieser Trend stellt neue Herausforderungen an den Entwicklungsprozess und erfordert innovative Methoden sowie Entwicklungswerkzeuge.

Die Simulation stellt eine Möglichkeit dar, der Komplexitätszunahme mechatronischer Produktionsanlagen durch eine frühzeitige digitale Absicherung entgegenzuwirken. Die kontinuierliche Weiterentwicklung eingesetzter Verfahren zeigt die Bestrebungen zur Integration der physikbasierten Simulation in die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) von kinematischen Anlagenverhalten. Aktuell finden jedoch solche Ansätze nur in wenigen Bereichen Anwendung, beispielsweise zur Absicherung von Palettiervorgängen in der Verpackungstechnik.

Zentrales Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Identifikation von Einsatzpotenzialen einer physikbasierten Simulation im Zuge des Entstehungsprozesses automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion. Dem Stand der Technik wird dabei zunächst ein repräsentativer Anlagenentstehungsprozess (AEP) gegenüber gestellt, der in Kooperation mit einem Automobilhersteller (OEM) sowie mehreren Zulieferern erfasst worden ist. Dabei werden bestehende Integrationsformen digitaler Werkzeuge sowie unternehmensspezifische Handlungsfelder für neue Simulationsverfahren aufgezeigt. Im Anschluss folgt eine Darstellung branchenspezifischer Potenziale, die nach Relevanz und Machbarkeit für einen Einsatz einer physikbasierten Simulation untersucht wurden und in vier repräsentativen Anwendungsfällen (Use-Cases) zusammengefasst sind.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die virtuellen Techniken repräsentieren etablierte Hilfsmittel zur Unterstützung unternehmensinterner wie auch -übergreifender Geschäfts- und Entwicklungsprozesse. Dazu werden im Folgenden der Stand der Erkenntnisse für Themenfelder des Virtuellen Engineering, der Virtuellen Inbetriebnahme sowie der physikbasierten Simulation skizziert.

2.1 Möglichkeiten der Prozessaufnahme

Das Grundprinzip „IT folgt dem Prozess“ spiegelt die Anforderungen an virtuelle Techniken und im Besonderen an die Simulation im Maschinen- und Anlagenbau wider. Im Vorfeld eines Simulationseinsatzes ist daher eine detaillierte Prozessaufnahme unabdingbar, um daraus die Bedarfe bezüglich der Simulationstechnik abzuleiten. Die Systematisierung von Prozessen kann durch unterschiedliche Modellierungsarten erfolgen, beispielsweise Prozesstabellen oder –landkarten (Koch 2011). Im Rahmen dieses Beitrags erfolgt die Prozessaufnahme mit Hilfe der *Structured Analysis and Design Technique (SADT)*, die zusätzlich zur Prozessbetrachtung die eingesetzten digitalen Werkzeuge beinhaltet (Ross 1977). Zu jeder Aktivität innerhalb des AEP (z.B. *Mechanik konstruieren*) kann ein skalierbares SADT Prozesselement definiert werden, der hinsichtlich der Abstraktionsstufe der Prozessbetrachtung und um Rahmenbedingungen bzw. Steuerungsinformationen erweiterbar ist.

2.2 Entwicklungsprozesse des Maschinen- und Anlagenbaus

Der Produktentstehungsprozess ist ein Geschäftsprozess (Gausemeier und Berger 2004), der sich durch einen Neuheitsgrad und damit verbundenen Unsicherheiten bezüglich der eingesetzten Technologien und Techniken zur Umsetzung auszeichnet

(Risse 2003). Darauf aufbauend fokussiert der AEP die Teilschritte bis zum Hochlauf einer Produktionsanlagen und ist von folgenden Trends beeinflusst:

Mechatronische Funktionsintegration

Entwicklungsprozesse im Maschinen- und Anlagenbau zeichnen sich zunehmend durch eine hohe Funktionsintegration verschiedener Disziplinen, der Mechanik, der Elektrik und im Besonderen der Software, aus (Abele und Reinhart 2011; Lewald 2008). Dies führt zu komplexen mechatronischen Produktionsanlagen wie auch Entwicklungsprozessen (Krause und Franke 2007). Ansätze einer interdisziplinären Standardisierung und die Einführung mechatronischer Baukästen sowie der Anwendung von Systems Engineering Methoden stellen dabei Ansätze dar, der Komplexitätszunahme entgegenzuwirken (Pahl et al. 1996).

Verteiltes Engineering

Global verteilte Absatzmärkte führen zu unternehmensübergreifenden Produktionsnetzen mit globalen Standorten, was einen erhöhten Abstimmungs- und Koordinationsaufwand im Engineering erfordert, um die verteilt ablaufenden Prozessschritte zu synchronisieren (Simon 2006). Spiegelberger (2011) spricht in diesem Zusammenhang auch von einem mechatronischen Reifegrad. Die Hersteller digitaler Entwicklungswerkzeuge versuchen diesem Trend durch neue Kollaborationsansätzen gerecht zu werden (Abramovici et al. 1998).

Einsatz digitaler Werkzeuge

Die Digitale Fabrik hat sich als ein Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von Methoden und Werkzeuge zur Simulation und funktionalen Absicherung von Produktionsprozessen etabliert (Verein Deutscher Ingenieure 2008). Vorteile der virtuellen Planung liegen in Zeit- und Kostenersparnissen. Gerade für Zulieferer der Automobilindustrie steigt die Bedeutung der Digitalen Fabrik, denn durch die Vorreiterrolle der OEMs ist ein Zwang zum Einsatz von Simulationsmethoden auch beim Anlagenbauer erkennbar. Unternehmensspezifisch angepasste Methoden zur virtuellen Planung und Simulation mechatronischer Anlagen sind wichtige Voraussetzungen für den Erfolg dieser digitalen Integrationsansätze.

2.3 Virtuelles Engineering und Virtuelle Inbetriebnahme

Eine durchgängige digitale Anlagenentwicklung und -absicherung hilft, Effizienz und Qualität bei Produktionsanläufen weiter zu steigern. Dabei stellen vor allem die beiden Methoden, das Virtuelle Engineering und die Virtuelle Inbetriebnahme, Lösungen dar, die aus dem Entwicklungsprozess automatisierter Rohbauanlagen heute nicht mehr wegzudenken sind (Kiefer und Borutta 2010).

Die Methode *Virtuelles Engineering* dient dabei der Visualisierung und simulationsgestützten Absicherung von Anlagenabläufen, Taktzeiten und Kollisionen unter Berücksichtigung beliebiger Produktvarianten, basierend auf einem kinematisierten 3D-Modell (Lacour 2011) der Produktionsanlage. In Anlehnung an Kiefer (2007) ist die *Virtuelle Inbetriebnahme* als Methode zur Absicherung der anlagenbezogenen Steuerungstechnik (u.a. SPS-/ RC-Programme, Produktionsleitsysteme) unter Verwendung eines mechatronischen Anlagenmodells zu verstehen. Des Weiteren dient die Virtuelle Inbetriebnahme der frühzeitigen Beurteilung, Optimierung und Absicherung des gesamten Anlagenverhaltens sowie des Zusammenwirkens von

Produkt, Anlagenmechanik, -elektrik und anlagenbezogener Steuerungstechnik vor dem Aufbau der realen Anlage.

Derzeit arbeiten die Automobilhersteller mit Hochdruck daran, diese beiden innovativen Absicherungsmethoden auch für andere automatisierte Gewerke (z.B. für die automatisierte Montage) gewinnbringend nutzbar zu machen. Innerhalb der Daimler AG werden die Methoden des Virtuellen Engineering und der Virtuellen Inbetriebnahme seit 2012 beispielsweise bereits für operative Umfänge im Kontext automatisierter Montageanlagen genutzt. Die prozessuale Verankerung dieser beiden Methoden kann dabei Abbildung 1 entnommen werden.

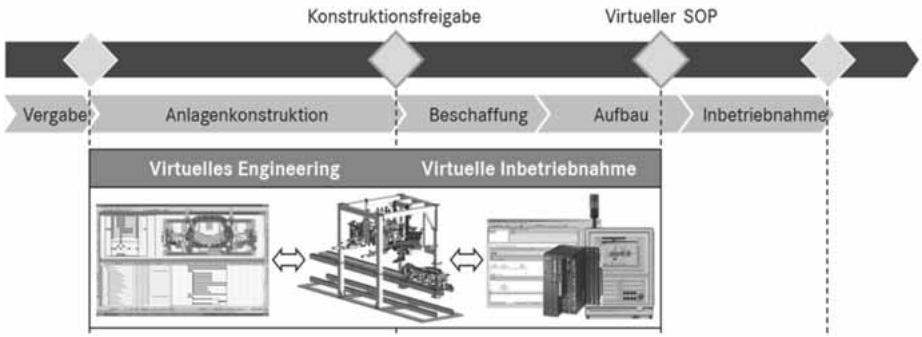


Abbildung 1: *Eingliederung der Methoden Virtuelles Engineering und Virtuelle Inbetriebnahme in den Anlagenentstehungsprozess bei Daimler (Kiefer und Walla 2012)*

Im Rahmen mehrerer Projekte konnten bereits vielfältige Nutzenpotentiale der beiden Absicherungsmethoden Virtuelles Engineering und Virtuelle Inbetriebnahme nachgewiesen werden, wie unter anderem:

- Effizienzsteigerung im gesamten Anlagenentstehungsprozess
- Frühzeitige Sicherstellung der Produkt-, Prozess- und Anlagenqualität
- Bessere Beurteilung des Anlagenreifegrades während des Anlagenentstehungsprozesses
- Schnellere und stabilere Produktionsanläufe – insbesondere nach Produktintegrationen im laufenden Produktionsbetrieb
- Verbesserte Softwarequalität und höhere Anlagenverfügbarkeit während des Produktionsbetriebs

2.4 Physikbasierte Anlagensimulation

Die physikbasierte Anlagensimulation ist ein neuer Lösungsansatz zur Integration von physikbasierten Modellen in die Virtuelle Inbetriebnahme bzw. mechatronische Simulation (Roßmann und Jung 2008; Spitzweg 2009; Lacour 2011). Der Ansatz der physikbasierten Simulation ermöglicht es, bestehende Simulationsmodelle mit physikalischen Effekten zu erweitern, um das dynamische Verhalten der Anlage, beispielsweise Effekte wie Kollision oder Reibung, abbilden zu können (Roßmann und Jung 2008). Dabei wird das Verhalten der Simulationsobjekte über physikalische Gesetzmäßigkeiten und optimierte Berechnungsverfahren aus der

Computergrafik echtzeitfähig simuliert (Bender 2007). Durch die Ableitung des Materialflussverhaltens aus der 3D-Geometrie entfällt der Programmieraufwand für die Simulation im 3D-Bereich weitgehend (Wünsch 2010). Der Ansatz einer physikbasierten mechatronischen Simulation reduziert daher den Modellierungsaufwand zur Simulation auf eine Parametrierung der physikalischen Eigenschaften und eine Kinematisierung der Modelle.

Die bisherigen Ergebnisse zur physikbasierten Simulation im Maschinen- und Anlagenbau beschränken sich auf die Simulation formstabiler Objekte und weniger Prozessgüter. Die Abbildung des biegeschlaffen Bauteilverhaltens ist mit den aktuellen Methoden aufgrund der notwendigen Rechenleistung nicht für eine Absicherung der Steuerungstechnik einsetzbar. Neuartige Ansätze für eine effiziente Simulation biegeschlaffer Objekte stellen aktuell Schwerpunkt mehrerer Forschungsaktivitäten im Bereich der Computergraphik dar. Die innovativen Ansätze stehen momentan jedoch nur eingeschränkt in den Physik-Engines wie Bullet oder PhysX® zur Verfügung und werden bislang nicht zur Physiksimulation in der Produktionstechnik eingesetzt. Neue Ansätze bei der Modellerstellung (Reinhart und Stich 2011) sowie weitere Funktionalitäten bei der Integration biegeschlaffer Bauteile tragen zukünftig aber wesentlich dazu bei, die physikbasierte Simulation auf zusätzliche Anwendungsgebiete auszuweiten (Reinhart und Stich 2013). Für die industrielle Anwendung der physikbasierten Simulation umfasst die Systemlandschaft eine Reihe geschlossener Software-Lösungen, wie beispielsweise Experior der iSILOG GmbH, Demo3D der SimPlan AG oder industrial physics der machineering GmbH. Die physikbasierte Simulation des Anlagenverhaltens ist mittels dieser Systeme lediglich für wenige, meist primitive Kollisionsgeometrien der Prozessgüter möglich und fokussiert Anwendungsgebiete aus der Verpackungstechnik und der Logistik. Zusätzlich bieten die Softwaresysteme nur eingeschränkt Schnittstellen zu bestehenden CAD-Systemen und finden aufgrund einer mangelnden Einbettung in die bestehenden Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozesse der Anlagenbauer somit nur sporadisch Anwendung.

3 Ist-Analyse des derzeitigen Entwicklungsprozesses automatisierter Montageanlagen

Aktuelle Anlagenentstehungsprozesse innerhalb des Automobilbaus sind, wie in Abbildung 2 dargestellt, in mehrere Phasen unterteilt, die vorwiegend sequentiell durchlaufen werden. Ein durchschnittlicher AEP erstreckt sich dabei über etwa ein Jahr, wobei die Dauer der einzelnen Phasen in Abhängigkeit von der Komplexität der Montageanlage variiert.

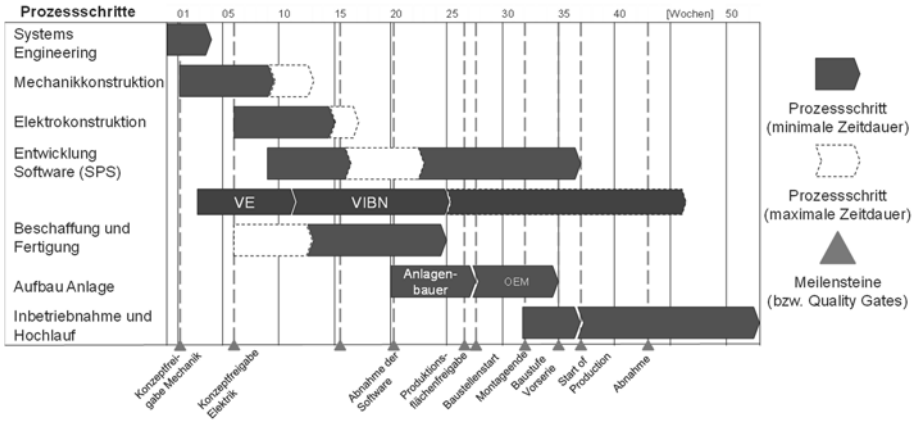


Abbildung 2: *Phasen und Meilensteine im heutigen AEP automatisierter Montageanlagen mit Erweiterung durch Virtuelles Engineering (VE) und Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)*

Die wichtigsten Meilensteine, die unternehmensspezifisch weiter detailliert sein können, stellen im Verlauf des Entwicklungsprozesses die Konstruktions-, Konzept-, Fertigungsfreigabe sowie Abnahmepunkte dar. Die Phase des Systems Engineerings ist als initialer Schritt von besonderer Bedeutung. Dabei werden in der unternehmensspezifischen Ausgestaltung in einem *Grobgerüst* gemeinsame Dokumente, Funktionen und Merkmale der Produktionsanlage strukturiert und während des Entwicklungsprozesses sukzessiv mit weiteren Daten angereichert. Somit steht ein zentrales Dokument zur Verfügung, das Transparenz schafft und redundante Aufwände vermeidet. Spezifische PDM- oder übergreifende PLM-Werkzeuge zur Bearbeitung der Funktionssicht sind in dieser frühen Phase aktuell zwar noch nicht im Einsatz, jedoch laufen im Umfeld des Maschinen- und Anlagenbaus bereits einige Pilotprojekte zu dieser Thematik.

Die Mechanik-Konstruktion bestimmt die Geometrie der Produktionsanlage (SADT in Abbildung 3 links), wobei die 3D-Konstruktion die Grundlage ist, von der weitere Entwicklungsdaten abgeleitet werden. Zur Erstellung dieser Konstruktionsdaten werden verstärkt Modulbaukästen eingesetzt, aus deren Standardbauteilen geschätzte 80 Prozent der Anlage bestehen. Die Ausgestaltung der Bausteine erfolgt dabei anhand von Richtlinien und Standards der OEMs. Zulieferer müssen daher einige Standard-Anlagenmodule in mehreren Entwicklungsumgebungen umsetzen, was eine Redundanz in der Datenerstellung und Pflege zur Folge hat. Die digitalen Werkzeuge werden in dieser Phase kundenspezifisch eingesetzt. Dies hat zur Folge, dass sich kundenorientierte Teams herausbilden, die sich auf einzelne Werkzeugketten fokussieren, die vom OEM gefordert werden. Beispiele der Entwicklungswerkzeuge sind Catia oder Delmia (Dassault Systèmes), ProE (PTC) sowie MS-Office Systeme. Innerhalb der Mechanik-Konstruktion entstehen, unter Berücksichtigung von Standards des OEM und der Produktvarianten, Fertigungszeichnungen, Pneumatikpläne und Taktzeitdiagramme sowie FMEA-Analysen und Beschaffungslisten.

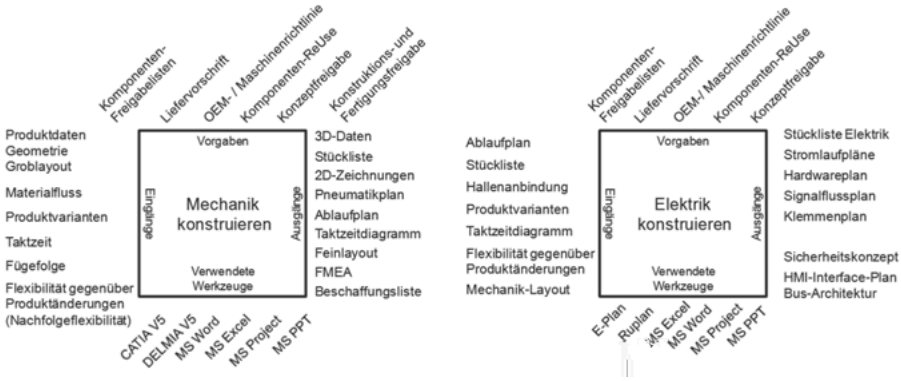


Abbildung 3: *SADTs für die Prozessschritte Mechanik und Elektrik konstruieren*

Die Elektro-Konstruktion umfasst die Festlegung der Busarchitektur, die Konstruktion von Schaltschränken und die Festlegung von Elektronik-Funktionen der automatisierten Anlage (SADT in Abbildung 3, rechts). Dieser Aspekt der Konstruktionsphase wird oftmals an weitere Zulieferer fremdvergeben, wodurch zusätzliche Abstimmungs- und Koordinationsaufwände entstehen. Auch müssen dadurch die Anforderungen des OEMs weitergereicht und eine zusätzliche Prüfung der Entwicklungsergebnisse eingeplant werden. Auf Grundlage der Anlagengeometrie und der benötigten Aktorik wie auch Sensorik können die Schaltschränke und elektronischen Komponenten dimensioniert werden. Dies bedeutet auch, dass Signalfluss-, Stromflusspläne sowie die Stücklisten für die Elektronik-Bauteile entstehen. Eingesetzte digitale Werkzeuge sind in dieser Phase E-CAD-Systeme (z. B. Eplan, Ruplan), sowie SAP- und MS-Office-Anwendungen.

Die Entwicklung der Software umfasst die Definition des Funktionsumfangs des Steuerungsprogramms. Dazu werden auch Symbollisten für Ein- und Ausgänge festgelegt und die Schrittfolgen der Anlage beschrieben (SADT in Abbildung 4, links). Die Softwareentwicklung beginnt während der Elektronik-/ Mechanik-Entwicklung, zieht sich jedoch aufgrund von Anpassungen der Software und aufwändiger Tests bis zum Abschluss der Inbetriebnahme beim OEM. Digitale Werkzeuge, die in dieser Phase zum Einsatz kommen, sind abhängig von der verwendeten Steuerungs- bzw. Robotertechnik (z.B. Step7, ROBCAD).

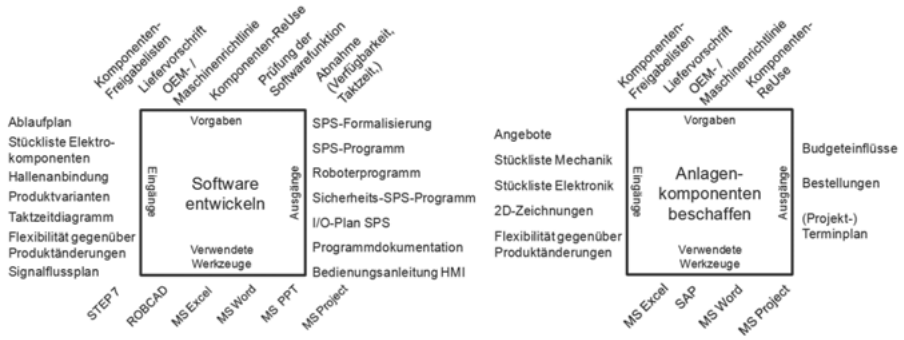


Abbildung 4: *SADTs für die Prozessschritte Software entwickeln und Anlagenkomponenten beschaffen*

Die Beschaffung (SADT in Abb. 4, rechts), hauptsächlich von mechanischen Bauteilen, beginnt parallel zur Mechanik-/ Elektronik-Entwicklung, wobei der Zeitraum je nach Komplexität der Bauteile variiert. Der Aufbau der Automatisierungsanlage beinhaltet die Planung der Montage, die Festlegung der Prüfreihenfolge, das Prüfen der Toleranzen und die Aufnahme von Fehlern (SADT in Abb. 5, links). Dies erfolgt in einem ersten Schritt beim Anlagenbauer und nach erfolgreichem Test beim OEM. Dabei ist ein Paradigmenwechsel erkennbar, da aufgrund des oftmals vorliegenden Zeitdrucks häufig der interne Aufbau beim Zulieferer entfällt Dadurch kann die Inbetriebnahme ausschließlich beim OEM erfolgen. Die Herausforderungen während der Baustellenphase sehen die Unternehmen in der Koordination und der Abstimmung mit dem OEM. Die Inbetriebnahme umfasst die Abnahme durch den OEM, wobei die spezifizierten Anforderungen anhand von Checklisten und Prüfprotokollen abgenommen werden (SADT in Abb. 5 rechts). Der nachfolgende Hochlauf erfordert zudem weitere Nachbesserungen und ist durch mehrere Produktionsstufen gekennzeichnet, in denen Produktionskennzahlen kontinuierlich gesteigert werden.

Die Aufnahme des IST-Prozesses in der Automobilindustrie hat ergeben, dass die Methoden der Virtuellen Inbetriebnahme im Bereich der Montage z. T. nur im begrenzten Rahmen eingesetzt werden. Verbesserungspotenziale in Kosten und Qualität sind hauptsächlich in der Softwareentwicklung durch die Verringerung von Fehlern und die Absicherung der Produktionsvorgänge (Schrittketten) erkennbar. Die Methoden der interdisziplinären Simulation werden dennoch bei vielen Zulieferern als ein vielversprechendes Hilfsmittel für zukünftige Projekte angegeben, um Entwicklungszeiten zu reduzieren. Dies ist laut Expertenmeinung maßgeblich durch geringere Aufwände der Aufbau-Phase begründet, da der physische Aufbau der Anlage beim Zulieferer und diesbezügliche Tests durch eine digitale Absicherung ersetzt werden können.

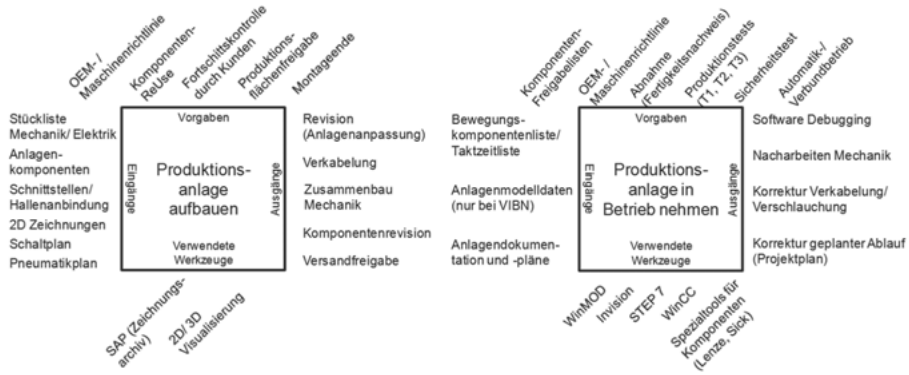


Abbildung 5: *SADTs für die Prozessschritte Produktionsanlage aufbauen und in Betrieb nehmen*

4 Identifizierte Nutzenpotentiale einer physikbasierten Anlagensimulation

Auf Basis des analysierten Anlagenentstehungsprozesses konnten vier wesentliche Use-Cases (UC) identifiziert werden, die im Folgenden im Detail dargestellt werden:

UC 1: Kontaktbehandlung zur Realitäts- und Effizienzsteigerung in der Anlagensimulation

Der erste Use-Case umfasst die Abbildung und effiziente Simulation von Kontaktbedingungen im Automobilbau. In bisher eingesetzten Werkzeugen zur mechatronischen Simulation müssen diese Bedingungen manuell programmiert werden, was zum einen mit einem hohen Aufwand verbunden ist, zum anderen eine weitere Fehlerquelle im Entwicklungsprozess darstellt. Über eine starrkörperbasierte physikbasierte Simulation wird in diesem Anwendungsszenario das mechatronische Modell erweitert. Die Vorteile liegen, neben dem reduzierten Modellierungsaufwand, vor allem in einer wesentlich höheren Anzahl möglicher Testszenarien und einer höheren Aussagekraft der Simulationsstudien.

UC 2: Berücksichtigung des Verhaltens biegeschlaffer Bauteile in der Anlagensimulation (Einsatzgebiete: VE und VIBN)

Biegeschlaffe Bauteile (z.B. Tankrüssel, Roboter-Schlauchpaket) sind häufig Bestandteil von Produkten oder Montageanlagen und beeinflussen direkt den Produktionsprozess. Einzelne Aspekte des Verhaltens biegeschlaffer Bauteile sollen durch eine physikbasierte Simulation im Rahmen des Virtuellen Engineering abgebildet werden. Dadurch werden die Voraussetzungen für eine frühzeitige Erkennung potentieller Störungen im Ablauf des Montageprozesses aufgrund formlabilen Bauteilverhaltens geschaffen.

UC 3: Energieberechnung und -visualisierung von automatisierten Montageanlagen

Das Vorgehen zur Absicherung der Anlagengeometrie sowie der Anlagenabläufe im Rahmen des Virtuellen Engineering soll um Energiebetrachtungen erweitert werden. Ziel ist es dabei, die realen Energieverbräuche der verfahrbaren Komponenten einer automatisierten Montageanlage (z.B. Hubtisch, Roboter) mit Hilfe der physik-

basierten Simulation zu berechnen und zu visualisieren. Diese Ergebnisse können anschließend als Basis für eine Analyse und Steigerung der Energieeffizienz der Montageanlagen dienen.

UC 4: Auslegung und Absicherung von Befüllprozessen

Die Absicherung von industriellen Befüllanlagen birgt erhebliches Verbesserungspotential: Der dem eigentlichen Befüllprozess häufig vorangehende Evakuierungsprozess der Luft aus einer zu befüllenden Komponente (z.B. Bremssystem) hängt entscheidend von der Bauteilgeometrie ab und wird bei der Prozess- und Anlagenentwicklung derzeit nicht berücksichtigt. Im Rahmen des Virtuellen Engineering kann mit Hilfe einer geeigneten physikbasierten Simulation der Evakuierungs- und Befüllprozess abgebildet und somit die optimalen Prozess- und Anlagenparameter frühzeitig erkannt und eingestellt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag skizziert den heutigen Entwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen im Automobilbau, illustriert die hierbei eingesetzten Methoden und Techniken und stellt auf Grundlage der durchgeführten IST-Analyse Einsatzpotentiale der physikbasierten Anlagensimulation dar.

Die bis dato durchgeführten Arbeiten liefern eine hervorragende Basis für den noch zu bestreitenden Weg der operativen Nutzbarmachung der physikbasierten Simulation zur Verbesserung des AEP. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

- Sammeln und Gewichten der Use-Case-spezifischen Anforderungen
- Analyse und Bewertung verfügbarer Ansätze zur Physiksimulation
- Methodenentwicklung zu deren operativen Nutzbarmachung im AEP
- Entwicklung eines Einführungskonzepts für eine operative Anwendung

Danksagung

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Forschungsprojekts *Auslegung automatisierter Produktionsanlagen im Automobilbau mit Hilfe einer physikbasierten mechatronischen Simulation* (AutoPhyS, GZ: RE 1112/35-1), das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft großzügig gefördert wird. Die Autoren danken der DFG für die Unterstützung bei der Projektbeantragung und –durchführung.

Literatur

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.

Abramovici, M.; Gerhard D.; Langenberg, L.: Supporting Distributed Product Development Processes with PDM. In: Krause, F.-L. (Hrsg.) New Tools and Workflows for Product Development CIRP Seminar STC Design. Berlin: Fraunhofer IRB 1998.

Bender, J.: Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität. Karlsruhe, Universität Karlsruhe 2007.

Gausemeier, J.; Berger, T.: Ideenmanagement in der strategischen Produktplanung – Identifikation der Produkte und Geschäftsfelder von morgen. In: Konstruktion Nr. 9. Düsseldorf: Springer 2004, S. 64-68.

Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Universität des Saarlandes 2007.

Kiefer, J.; Borutta, H.: Virtuelle Inbetriebnahme im Rohbau Werk Wörth, In: 6. Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, Fulda, 2010.

Kiefer, J.; Walla, W.: Potentiale im Sonderanlagenbau am Beispiel der PKW-Hochzeit, In: 8. Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, Regensburg, 2012.

Koch, S.: Einführung in das Management von Geschäftsprozessen. Six Sigma, Kaizen und TQM. Berlin, Heidelberg: Springer 2011.

Krause, F.-L.; Franke, H.-J.: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. München, Wien: Hanser 2007.

Lewald, A.: Gedanken zur Mechatronik aus Sicht eines PLM Anbieters (PTC). In: Eigner, M. (Hrsg.): Mechatronik - die Herausforderung an Integration im Produktentstehungsprozess. Tagungsband - Jahrestagung 2008 - Berliner Kreis. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2008.

Lacour, F.-F.: Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen. München: Utz 2011.

Mensch und Mechatronik, <www.mensch-mechatronik.de>. Zugegriffen am 05.06.2013.

Pahl, G; Beitz, W.; Wallace, K.: Engineering design. A systematic approach, 2. Auflage. Berlin: Springer 1996.

Reinhart, G.; Stich, P.: Auslegung von Transportprozessen mit Hilfe der physikbasierten mechatronischen Simulation. In: Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn: HNI-Verlagsschriftreihe 2011.

Reinhart, G.; Stich, P.: Physikbasierte Modelle formlabiler Objekte zur Auslegung produktionstechnischer Systeme. Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn: HNI-Verlagschriftreihe 2013.

Risse, J.: Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie. Berlin: University of Berlin 2003.

Roßmann, J.; Jung, T.: Dynamiksimulation für Virtuelle Welten: Erfahrungen, Anwendungen, Methoden. In: 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI-Verlagsschriftreihe 2008.

Ross, D. T.: Structured analysis (SA). A language for communicating ideas. In: IEEE Transactions on Software Engineering. 1977.

Simon, S.: Benchmark im Werkzeugmaschinenbau. Ein Beitrag zur wettbewerbsfähigen Produktentwicklung. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt 2006.

Spiegelberger, B.: Anwendergerechte Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse für kleine und mittlere Unternehmen im Maschinenbau. Göttingen: Sierke 2011.

Spitzweg, M.: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen. München: Utz 2009.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Richtlinie 4499, Blatt 1: Digitale Fabrik Grundlagen. Berlin: Beuth 2008.

Wünsch, G.: Testen Testen Testen. In: Mechatronic & Engineering, 2010.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Bausteinbasierte Simulation des Ladungsumschlags in trimodalen Containerterminals

Modularised Simulation of Container Handling in Trimodal Container Terminals

Carsten Eckert, Philipp Teitge, TU Berlin, Berlin (Germany),
eckert@naoe.tu-berlin.de, ph.teitge@gmx.de

Dirk Steinhauer, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Flensburg (Germany), steinhauer@fsg-ship.de

Abstract: Westhafen Berlin is one of the largest inland ports in Germany. Due to its situation in the city centre gains in capacity cannot be achieved by expansion but only by adaptation of container handling strategies. In the course of the simulation study presented in this paper the current strategies have been analyzed in terms of their overall performance and robustness. Alternative strategies have been developed and comparatively evaluated. Furthermore, effects of interference and severance of additional trains and barges have been examined. For the simulation study a module-based simulation approach was used. This offers the option of prefabricated, parameterized and reusable modules from which simulation models can be easily created and adapted flexibly to the respective application.

1 Einleitung

Der Westhafen Berlin ist mit einem jährlichen Ladungsumschlag von über 4 Mio. Tonnen einer der größten Binnenhäfen Deutschlands. Die Lage im Innenstadtbereich lässt eine Kapazitätssteigerung durch eine Flächenerweiterung allerdings nicht zu. Steigende Umschlagszahlen und schnellere Durchlaufzeiten der Container können nur durch eine Anpassung der Umschlagsstrategien erreicht werden.

Im Zuge der in diesem Beitrag vorgestellten Simulationsstudie wurden die aktuelle Strategie für den Containerumschlag im Westhafen hinsichtlich ihrer Robustheit analysiert und anschließend alternative Strategien entwickelt und vergleichend bewertet. Weiterhin wurden Auswirkungen von Störeinflüssen sowie Abfertigungen weiterer Komplettzüge und Binnenschiffe zusätzlich zum aktuellen Umschlags-volumen untersucht.

Für die Simulationsstudie wurde auf einen bausteinbasierten Simulationsansatz zurückgegriffen, der es ermöglicht, aus vorgefertigten parametrisierten Modulen mit wenig Aufwand Simulationsmodelle zu erstellen und diese flexibel an den jeweiligen Einsatzzweck anzupassen.

Der eingereichte Beitrag stellt auch die Entwicklungen an einem Bausteinkasten für die Simulation der Umschlagsprozesse in trimodalen Containerterminals vor.

Bereits existierende Simulationsstudien von Containerterminals sind für die Abbildung von Binnenterminals nicht direkt nutzbar, da die Abläufe in Binnenterminals nicht so stark standardisiert und im Vergleich zu Seeterminals sehr verschieden sind (Baron 2011; Kemme 2011). So besitzen beispielsweise Containerbrücken eines Binnenterminals einen größeren Aufgabenbereich. Hinzu kommt, dass meist eine größere Zahl an verschiedenen Containerarten und Fahrzeugtypen berücksichtigt werden muss. Der Automatisierungsgrad in diesen Terminals ist ebenfalls geringer, was zu weniger überschaubaren Materialflüssen und Umschlagsstrategien führt. Die Simulation in kleineren Binnenterminals wird damit größtenteils zu aufwändig und dadurch unattraktiv für die Betreiber.

Nichtsdestotrotz wurden solche Containerterminals bereits in Simulationsstudien untersucht (Latki et al 2010).

2 Westhafen Berlin und Besonderheiten des Containerterminals

Der Westhafen Berlin wird von der Berliner Hafen- und Lagerhausgesellschaft mbH (BEHALA) betrieben. Abbildung 1 zeigt eine Luftaufnahme des trimodalen Containerterminals im Westhafen, in dem Container sowie Wechselbrücken vom Lkw, von der Bahn und vom Binnenschiff uneingeschränkt untereinander umgeschlagen werden können. Der Containerumschlag wird über zwei Portalkräne mit einer Tragfähigkeit von je 45 t durchgeführt. Das Containerdepot fasst ca. 1000 TEU mit speziellen Stellplätzen für Gefahrgut und Kühlcontainer. Das Terminal verfügt über je zwei Gleise und LKW-Abfertigungsspuren mit jeweils 350 m Länge sowie eine Kaikante für Binnenschiffe von 300m Länge.

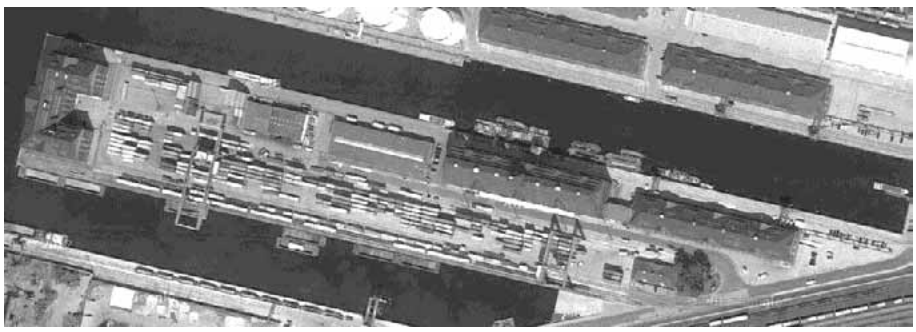


Abbildung 1: *Luftaufnahme Containerterminal Westhafen Berlin (Quelle: Google Earth)*

Im Folgenden werden Besonderheiten des Containerumschlags im Westhafen beleuchtet, die für die Modellerstellung eine besondere Herausforderung darstellten.

2.1 Portalkräne

Die beiden Portalkräne arbeiten auf einer durchgehenden Kranbahn von 400 m Länge und haben gleiche Tätigkeitsfelder. Das bedeutet, dass sich ihre Arbeits-bereiche zu großen Teilen überschneiden.

Die Abstimmung der beiden Kräne zueinander stellt daher täglich eine große Herausforderung für die Kranfahrer dar, und auch im Hinblick auf die Modellerstellung und die Analyse verschiedener Umschlagstrategien ist dies ein entscheidender Faktor.

Hinzu kommt der breit gefächerte Aufgabenbereich der Kräne. In Seehäfen konzentrieren sich Containerbrücken sehr oft nur auf die Be- oder Entladung, oder sind für die Abfertigung nur eines Verkehrsmittels zuständig. Dagegen können im Westhafen alle Verkehrsmittel von beiden Portalkränen abgefertigt werden, egal ob es sich um die Beladung oder die Entladung handelt. Dies geschieht im nahtlosen Übergang, bzw. die Abfertigung von Lkw und Zügen zum größten Teil parallel. In erster Linie ist das den unterschiedlichen Strategien bei der Zugabfertigung geschuldet.

2.2 Zugabfertigung

Züge der Seehinterlandsverbindungen aus Hamburg bzw. Bremerhaven und Amsterdam werden direkt nach Ankunft im Terminal komplett ent- und wieder beladen. Dies passiert in der Nacht (Hamburg, Bremerhaven) oder am Wochenende (Amsterdam). Dazu müssen parallel nur vereinzelt auch Lkw abgefertigt werden.

Dagegen wird die Ladung von Parcel InterCity-Zügen (PIC) direkt zwischen Zug und Lkw umgeschlagen. Dies bedeutet, dass die Züge tagsüber im Terminal verweilen. Hier rückt wiederum das Zusammenspiel der Kräne in den Vordergrund. Weiterhin spielen die Positionierung der Lkw und die Stellplatzfindung auf den Waggons eine entscheidende Rolle für einen reibungslosen Containerumschlag.

Die Stellplatzvergabe erfolgt kundenorientiert. Eine Zugliste mit Stellplatzvorgaben, wie bei den Seehinterlandsverkehren gibt es nicht. D. h., dass die Stellplätze auf den beiden Zugabschnitten der jeweiligen Kunden frei gewählt werden können.

2.3 Stellplatzvergabe für Container

Die Vergabe der Stellplätze im Containerdepot kann auf zwei Arten erfolgen. Container die per Lkw geliefert werden, bekommen ihren Stellplatz bei der Anmeldung zugewiesen. Dagegen vergeben die Kranfahrer die Stellplätze für Container, die per Bahn geliefert werden.

Die Stellplatzangabe steht zusätzlich nur für einen bestimmten Bereich im Containerdepot. Die genaue Positionierung in den jeweiligen Bereichen erfolgt ebenfalls operativ durch die Kranfahrer. Die Strategien bei der Stellplatzvergabe und der genauen Positionierung sind sehr stark durch die Erfahrung der einzelnen Terminalmitarbeiter geprägt.

Eine Möglichkeit, die Zugabfertigungsdauer zu reduzieren, ist das Vorsortieren des Containerdepots. Dabei werden in Zeiten geringerer Auslastung (z.B. zum Beginn der Nachtschicht) Container, deren Umschlag für die nähere Zukunft avisiert ist, im Depot derart bereitgestellt, dass sie bereits neben dem geplanten Wagon stehen oder zumindest nicht unter anderen Containern die erst zeitaufwändig umgestapelt werden müssten. Allerdings führt dies zu Mehrarbeit einer Schicht zugunsten von Zeitersparnissen einer anderen. Hier kann durch eine Simulationsstudie die Akzeptanz dieses Vorgehens unter den Kranführern gesteigert werden.

3 Simulation Toolkit Shipbuilding

Die hier beschriebene Simulationsstudie wurde im Rahmen der Kooperation zwischen dem Fachbereich Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme der Technischen Universität Berlin und der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG (FSG) durchgeführt. In dieser Kooperation werden seit 2005 Bausteine für die Modellierung von logistischen Systemen im maritimen Umfeld entwickelt. Nachdem zunächst RoRo- und Fährterminals (Eckert et al. 2009) sowie Offshore-Windparks (Steinhauer 2013) analysiert wurden, rückten in der jüngsten Vergangen-heit auch Containerterminals in den Fokus der Arbeiten (Abb. 2).

Abbildung 2: *Simulationsmodell eines beispielhaften Containerterminals*

Basis für die gemeinsamen Simulationsaktivitäten der Kooperationspartner ist der Simulation Toolkit Shipbuilding (STS), welcher seit dem Jahr 2000 bei der FSG und in verschiedenen Kooperationen entwickelt wird. Dort wurden zunächst Simulationsbausteine für die Modellierung von schiffbaulichen Produktionsabläufen erarbeitet, welche später durch die branchenübergreifende Kooperation mit dem Bauwesen in ihrer Anwendung verallgemeinert wurden. Aufgrund des entscheidenden Einflusses der Logistik auf den Produktionsprozess deckt der STS auch wesentliche Logistikfunktionen ab, wie die Verwaltung von Transport- oder Lagerressourcen, das Management von Transporten, den Aufbau eines Verkehrsnetzes sowie die Belegung von Flächen. Zudem ist eine Reihe spezifischer Transportmittel mit ihren Eigenschaften abgebildet, wie zum Beispiel Kräne, Fahrstühle oder Flurförderzeuge.

Aufgrund von einer zunehmenden Zahl an Simulationsaufgaben im Bereich der maritimen Logistik, welche zunächst für die Entwurfs- und Vertriebsabteilungen der FSG, später auch als Dienstleistungsprojekte für externe Kunden bearbeitet wurden, ist der STS um sogenannte Add-on Bibliotheken erweitert worden (Abb. 3). Hier wurden die Basisbausteine des STS für die Verwendung in spezifischen Aufgabengebieten hergerichtet und um aufgabenspezifische Funktionen ergänzt.

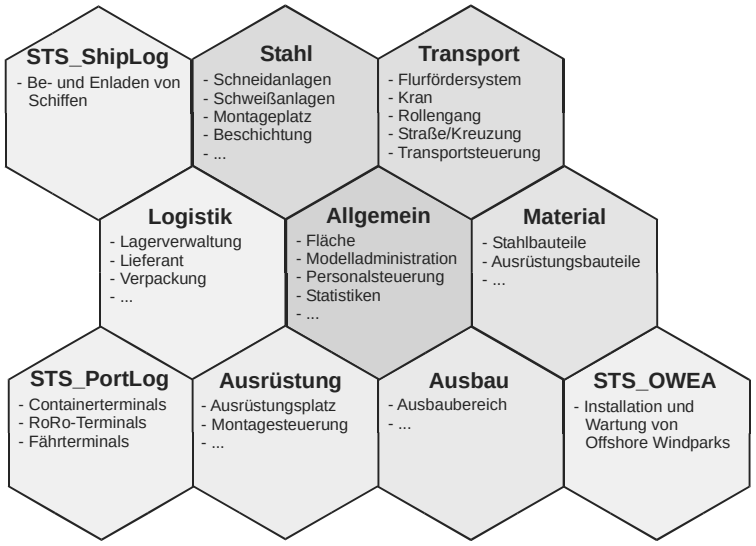


Abbildung 3: *Struktur der Bausteine des STS inklusiver der Add-on Bibliotheken*

Die STS Add-on Bibliothek STS_PortLog beinhaltet in Bausteinen aggregierte Simulationsfunktionalitäten zur Modellierung von logistischen Prozessen in Häfen.

4 Datenerhebung

Grundlage für die Erstellung des Simulationsmodells war die Analyse der Abläufe im Westhafen. Aus den Analyseergebnissen wurde ermittelt, welche Funktions-bereiche und Interaktionen bereits über die angewandte Simulationssoftware abgebildet werden können und in welchen Bereichen noch Anpassungen nötig waren.

Für die bausteinbasierte Simulation stellen die in Abbildung 4 gezeigten Bereiche das Gerüst für das Simulationsmodell des Containerterminals Westhafen. Die daraus resultierende Notwendigkeit der Entwicklung neuer Bausteine und deren Integration in den STS sind Thema des Kapitels 5.

Für die Abbildung des Lagerbestands zum Zeitpunkt des Simulationsstarts dienen Lagerbestandslisten aus dem Datenarchiv der BEHALA. Lagerbestandslisten enthalten alle containerrelevanten Daten, die für die Containererstellung sowie für den Transportverlauf des Containers von Bedeutung sind. Es sind alle Daten über den Eingang und Ausgang am Terminal vorhanden. Hinzu kommen Informationen über die eindeutige Bezeichnung, den Typ, den Kunden und den Stellplatz des jeweiligen Containers. Lkw-, Zug- und Schiff-Eingangslisten sind identisch aufgebaut. Aus den

Listen gehen somit neben allen containerbezogenen, auch alle Daten über die für den An- und Abtransport zuständigen Transportmittel hervor. Für die Simulation spielen Lkw-Eigenschaften, wie Typ und Kennzeichen eine besondere Rolle.

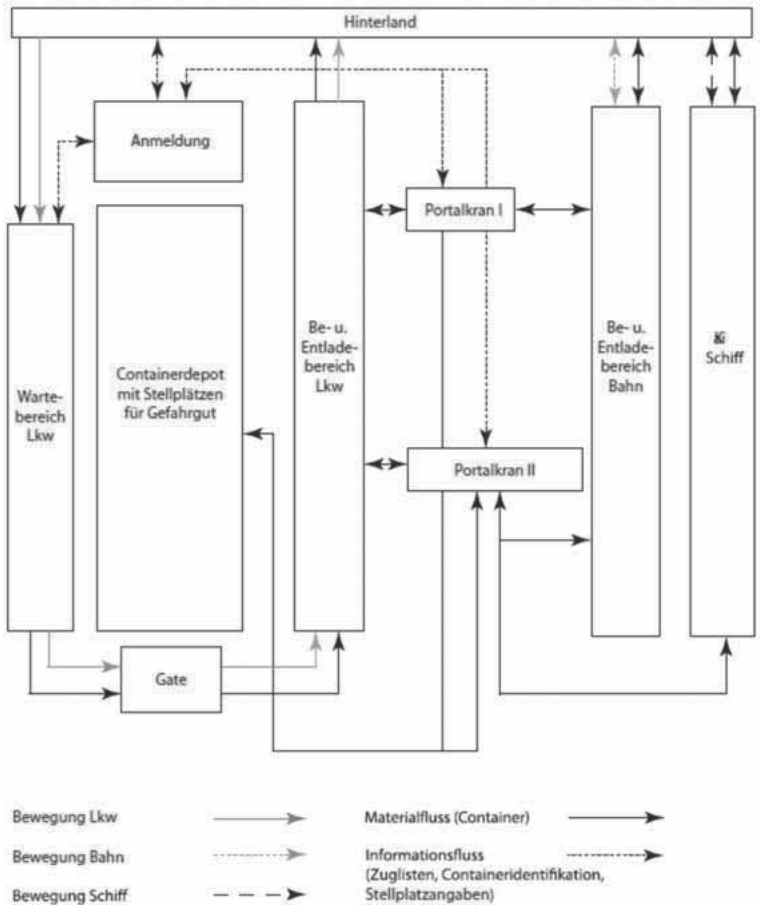


Abbildung 4: *Funktionsbereiche, Informations- und Materialfluss im Containerterminal Westhafen*

Die Stellplatzverteilung der Container auf den Zügen wurde über Zuglisten ermittelt. Zuglisten geben Auskunft über Container, die mit ein und demselben Zug eintreffen oder abtransportiert werden. Dagegen stellen Zug-Eingangslisten eine Übersicht der Container, die per Zug über einen bestimmten Zeitraum ans Terminal geliefert wurden. Die Zuglisten sind in erster Linie wichtig, um eine Aussage über die Auslastungen der einzelnen Züge treffen zu können.

Informationen über die aktuelle Umschlagstrategie und der Strategie zur Containereinlagerung wurden durch Interviews mit Terminalmitarbeitern und bei der Begleitung der Kranfahrer während Zug- und Lkw-Abfertigungen gesammelt.

5 Modellerstellung

Aus der Analyse der benötigten Simulationfunktionen und dem Vergleich mit den existierenden konnte der Bedarf an Ergänzungen und Anpassungen der Simulationsbausteine des STS ermittelt werden. Bezogen auf die physischen Komponenten des Containerterminals bestand in erster Linie Handlungsbedarf bei der Abbildung des Lkw-Abfertigungsbereichs. Weiterhin spielten die Entwicklung von Gleisbausteinen und eine Weiterentwicklung des bereits bestehenden Flächenbausteins eine Rolle. Im Bereich der grundlegenden Steuerungs- und Schnittstellenfunktionen bestand die größte Herausforderung in der Umsetzung der Stellplatzvergabe durch die Kranfahrer und in der Abstimmung der Kräne untereinander. Die Stellplatzvergabe wird über eine Erweiterung des Verpackungsbausteins ermöglicht, welche die Kranabstimmung über externe Methoden zulässt. Außerdem mussten Konzepte für die Zug- und Lkw-Erstellung entwickelt werden. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die neu entwickelten Bausteine und deren Funktionalitäten.

Tabelle 1: *Neu entwickelte Bausteine*

Baustein	Funktionalität
STS_AllocationManagement	Belegung von Ressourcen
STS_MultiLaneRoad	Ausweichspuren für Lkw
STS_RailwayTrack	Gleis
STS_RailwaySwitch	Möglichkeit zum Spurwechsel (Weiche)
STS_TrainGenerator	Generierung von Zügen

Mit Hilfe des STS_AllocationManagement kann die Belegung von Ressourcen unter Berücksichtigung von Kapazitäten und Anforderungen vorgenommen werden. Hier wird die Zuweisung von unterschiedlichen Containern zu Lkw oder Zuganhängern verwaltet, so dass zum Beispiel ein 40ft Auflieger auch eine Kombination aus mehreren 20ft oder 10ft Containern aufnehmen kann.
Durch den neu erstellten STS_TrainGenerator können Züge nach bestimmten Parametern oder nach Zuglisten generiert und beladen werden.
Der Baustein STS_MultiLaneRoad bildet einen mehrspurigen Weg mit der Möglichkeit des flexiblen Fahrspurwechsels ab, die für die Modellierung der Abfertigungsspur für Lkw herangezogen werden kann. Der Abfertigungsbereich besteht aus zwei Spuren, wobei eine Spur die Parkbuchten für die Be- und Entladung bildet und die zweite die Ein- und Ausfahrt der Lkw ermöglicht.
Zusätzlich zu den in Tabelle 1 aufgeführten Bausteinen wurde der Bausteinkasten um eine Vielzahl an Containertypen ergänzt.

Neben den gänzlich neu erstellten Bausteinen wurden zusätzlich einige Funktionen weiterentwickelt (Tab. 2).

Tabelle 2: *Weiterentwickelte Bausteine*

Baustein	Funktion	Ergänzte Funktionalität
STS_Source	STS Quelle	Zuordnung von Objektklassen nach Kriterien
STS_Supplier	Lieferant	Flexible Zuordnung von Fahrzeugklassen
STS_Packaging (SelectTECtr)	Verpackung	Benutzerdefinierte Auswahl von Transporthilfsmitteln
STS_Space	Flächenbelegung	Abstand der eingelagerten Objekte in X- und Y-Richtung

Der Einsatz der Portalkräne wird über externe Methoden geregelt. Dabei ergibt sich die Zuständigkeit für eine Containerbewegung aus der Container- bzw. Transportmittelposition am Terminal. Das bedeutet, der Bereich in dem beide Kräne arbeiten können, ist klar aufgeteilt und orientiert sich dabei am Stellplatz des umzuschlagenden Containers oder dem beauftragten Transportmittel. So ist beispielsweise der Zuständigkeitsbereich bei einem Containerumschlag in oder aus dem Depot anhand des Stellplatzblocks geregelt. Bei einem Direktumschlag von Lkw auf den Zug oder umgekehrt orientiert sich die Zuständigkeit dagegen an dem Waggonstellplatz auf dem Zug. Je nach Anzahl der Waggons sprechen die Kranfahrer vor der Ent- oder Beladung ab, welcher Kran welchen Teil des Zuges abdeckt.
In den externen Methoden werden zunächst die Arbeitsbereiche jedes Krans abgesteckt. Anschließend werden die Regelungen für Direktverladungen und Verladungen in das Depot getroffen. Die Nummer des Stellplatzblocks, auf die es bei Verladungen in das Depot ankommt, ist anhand eines Attributs des Containers abrufbar. Bei einer Direktverladung wird dagegen die Position des Waggons ermittelt. Die Vorgaben von Stellplatzblock und Waggonposition kann einfach auf wechselnde Anforderungen angepasst werden. Abschließend wird der Zuständige Portalkran angefordert. Wenn an den Kran bereits Anforderungen gestellt wurden, werden die Aufträge der Reihe nach ausgeführt. Dabei werden Verladungen mit einer hohen Priorität als erstes abgearbeitet. Das ist beispielsweise der Fall, wenn während der Entladung eines Zuges ein Lkw abgefertigt werden muss. Lkw-Abfertigungen haben eine höhere Priorität, damit sie nicht durch langwierige Zugabfertigungen aufgehalten werden.
Methoden, die den Containerumschlag aus dem Depot regeln, ist eine weitere externe Methode vorgeschaltet. Sie überprüft zunächst, ob evtl. Container innerhalb des Depots umgestellt werden müssen, um an den benötigten Container zu gelangen. Ist das der Fall, werden über Funktionen des Verpackungsbausteins neue Stellplätze für diese Container gesucht.

Wie erwähnt, ist der Verpackungsbaustein auch für die Umsetzung der generellen Stellplatzvergabe, die durch die Kranfahrer vorgenommen wird zuständig. Die Daten, die für die Stellplatzvergabe relevant sind, wie der Containertyp und dem Kunden, sind ebenfalls über Attribute des Containers abrufbar. Die Belegung eines Stellplatzblocks ist ebenfalls von Bedeutung. Diese wird bei der Stellplatzsuche innerhalb eines Blocks als erstes untersucht. Wurden in dem gewünschten

Stellplatzblock freie Plätze ermittelt, wird aus diesen der am besten geeignete Stellplatz in Abhängigkeit von Containertyp und Kunden ermittelt.

Neben den neu erstellten und weiterentwickelten Bausteinen konnte mit der Arbeit an dem Projekt Westhafen zusätzlich die Kommunikation zwischen den Bausteinen verbessert werden. Hier ist u. a. die Positionserkennung von Objekten durch den Kran zu nennen. Abbildung 5 zeigt das fertige Simulationsmodell bei der Abbildung einer Schiffentladung parallel zur Entladung eines Zuges und zur Abfertigung von Lkw.

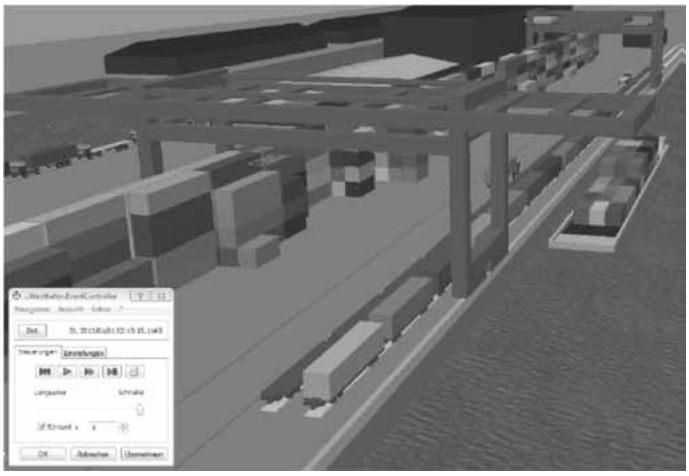


Abbildung 5: *3D-Animation Containerterminal Westhafen*

6 Ergebnisse

Im Laufe der vorgestellten Simulationsstudie wurden verschiedene Strategien für die Umschlagsreihenfolge, der Stellplatzzuweisung im Containerdepot sowie der Zusammenarbeit der beiden Portalkrane verglichen und Vorschläge für geeignete Strategien bei verschieden Terminalabläufen unterbreitet.

Beispielhaft sollen hier die Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Strategien zur Stellplatzauswahl im Depot und auf den Zügen vorgestellt werden. Abbildung 6 zeigt die prozentuale mittlere Abfertigungszeit eines Zuges bei verschieden Strategien. Strategie 1 (Umschlag eines Containers auf einen festgelegten Wagonstellplatz von einem beliebigen Depotstellplatz aus) stellt dabei den „Standardwert“ dar. Es ist zu erkennen, dass eine Vorsortierung der Container im Depot bzw. die Positionierung der LKW direkt neben den entsprechenden Wagons die Gesamtumschlagzeit der Züge verkürzt. Es hat sich gezeigt, dass die für die Vorsortierung zusätzlich nötigen Kranbewegungen gut in Zeiten geringerer Auslastung gelegt werden können.

Auch eine Zuordnung der Stellplätze auf dem Zug nach Containerstandort im Depot (also eine willkürlich anmutende Wagonbelegung) reduziert die Gesamtumschlagszeit erheblich. Allerdings ist hier zu berücksichtigen inwieweit sich dies auf die Umschlagsvorgänge im Zielhafen auswirkt.

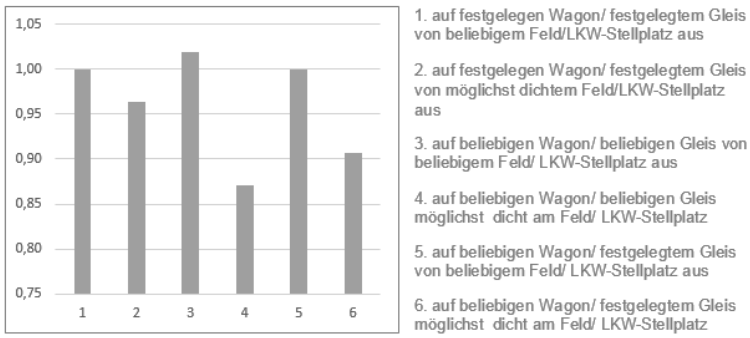


Abbildung 6: *Vergleich der prozentualen mittleren Abfertigungszeit eines Zuges bei verschiedenen Strategien zur Zuweisung von Containerstellplätzen (Baron 2011)*

Insgesamt kann durch die beschriebenen Umschlagsstrategien eine schnellere Zugbeladung erreicht werden. Resultat ist die Gewinnung von Kapazitäten für die Abfertigung zusätzlicher Züge.

Weiterhin wurden die Auswirkungen der Abfertigung von zusätzlichen Zügen und Binnenschiffen parallel zum aktuellen Tagesgeschäft untersucht sowie die theoretische Maximalauslastung des Terminals ermittelt und bestehende Engpässe identifiziert. Außerdem wurden verschiedene „Notfallpläne“ für den Fall verspätet eintreffender Züge und Schiffe sowie dem Ausfall von Umschlagsgerät bewertet.

Literatur

Baron, B., Analyse der Umschlagvorgänge Seeschiff-Schiene in modernen Containerterminals, Technische Universität Berlin, 2011

Berliner Hafen- und Lagerhausgesellschaft mbH, Eingangsliste Schiene DHL1668 18.09.2012, Seite 1, Berlin 2013

Eckert, C., Fliege, F., Steinhauer, D., Bausteinbasierte Simulation logistischer Prozesse in RoRo-Terminals, Tagungsband HTG-Kongress 2009, Seehafen Verlag, 2009

Kemme, N., Documentation of a Simulation Model for automated Rail-Mounted-Gantry-Crane Systems at Seaport Container Terminals, Universität Hamburg, 2011

Latki, B. et al.: Prozess-Simulation als Methodenwerkzeug für den Funktionsnachweis komplexer Infra- und Suprastrukturplanungen am Beispiel eines Terminals für den intermodalen Ladungsverkehr. In: Gert Zülch, Patricia Stock (Hrsg.) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, KIT Scientific Publishing, 2010

Steinhauer, D.: The Simulation Toolkit Shipbuilding – 10 Years of Cooperative Development and Interbranch Applications. In: Proceedings of the 10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT), Berlin (Germany), 2011, S. 453-465.

Steinhauer, D.: Simulation von Offshore-Versorgungskonzepten: Von der Errichtung bis zum Betrieb. In: Holbach, G., Eckert, C. (Hrsg.): Maritime Lösungen für die Offshore-Windparkversorgung, Universitätsverlag der TU Berlin, Berlin, 2013, S. 145-162.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Entwicklung von Prioritätsregeln für Umschlagvorgänge in Binnenhafencontainerterminals mittels Simulation

Development of Priority Rules for Handlings in Inland Port Containerterminals with Simulation

Uwe Clausen, Jan Kaffka, TU Dortmund, Dortmund (Germany),
clausen@itl.tu-dortmund.de, kaffka@itl.tu-dortmund.de

Abstract: Free space to expand the handling area in a container terminal is often not available. Therefore terminal operators have to improve operating strategies to increase the capacity of the terminal. For this purpose the authors developed a handling task sequencing strategy based on priority rules for a multi crane module in a container terminal. In this paper this control strategy is compared with other state of the art control strategies to find out which crane control strategy is the best strategy for a container terminal. State of the art strategies only consider terminal specific requirements like travel time improvement, but especially an inland port container terminal is also subject to market requirements such as short waiting times of the vehicles. Those requirements for terminals are often different so that a handling task sequencing is required which can be adjusted to the specific needs of a terminal.

1 Einführung

Containerterminals können grundsätzlich in Seehafen- und Binnenhafencontainerterminals unterschieden werden. Seehafencontainerterminals haben nach Lee et al. (2008) die Hauptaufgabe die großen Containerschiffe innerhalb der vereinbarten Liegezeit abzufertigen. Die Containerschiffe müssen so schnell wie möglich ent- und beladen werden. Im Gegensatz dazu agieren Binnenhafenterminals als Hinterlandhubs für Seehafencontainerterminals. Export Container werden im Vorlauf im Terminal gesammelt, im Containerterminal zwischengelagert und dann gebündelt nach dem Just in Time Prinzip zum Seehafen transportiert. Zusätzlich werden die Import Container im Nachlauf in das Hinterland an die Empfänger disponiert. Damit die Just in Time Anlieferung fehlerfrei funktioniert, ist die Hauptaufgabe der Binnenhafencontainerterminals somit die Pufferung der Container und die Einhaltung der Fahrpläne der Transportmittel. In einem Containerterminal existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen

Teilbereichen, wie beispielsweise die Abfertigungsbereiche der Verkehrsmittel, das Depot oder die Umschlagmittel. Diese Teilbereiche werden separat voneinander gesteuert, so dass sich ein hoher stochastischer Einfluss und Abhängigkeiten untereinander ergeben. Dies macht eine Verbesserung des Betriebs eines Containerterminals ohne technische und methodische Unterstützung komplex. Verbesserungen in einem Teilbereich beeinflussen die jeweiligen anderen Teilbereiche und führen nicht automatisch zur Verbesserung des Gesamtbetriebes

Hauptumschlagmittel in Containerterminals sind die Krananlagen zum Umschlag der Container, welche entweder als Kaikrane zum wasserseitigen Umschlag oder als Stapelkrane, für den landseitigen Umschlag oder die Lagerung der Ladeeinheiten, konzipiert sind. In Seehafencontainerterminals werden unterschiedliche Krananlagen genutzt. Es werden jeweils spezialisierte Krane für die einzelnen Funktionsbereiche eines Terminals eingesetzt, welche mittels eines Transportsystems miteinander verknüpft sind. Im Unterschied dazu werden in Binnenhafenterminals die Krane, aufgrund des wesentlich geringeren Platzangebotes, in der Regel als alleiniges Umschlagmittel eingesetzt, welches sowohl die wasserseitigen als auch die landseitigen Operationen durchführt (s. Abb. 1).

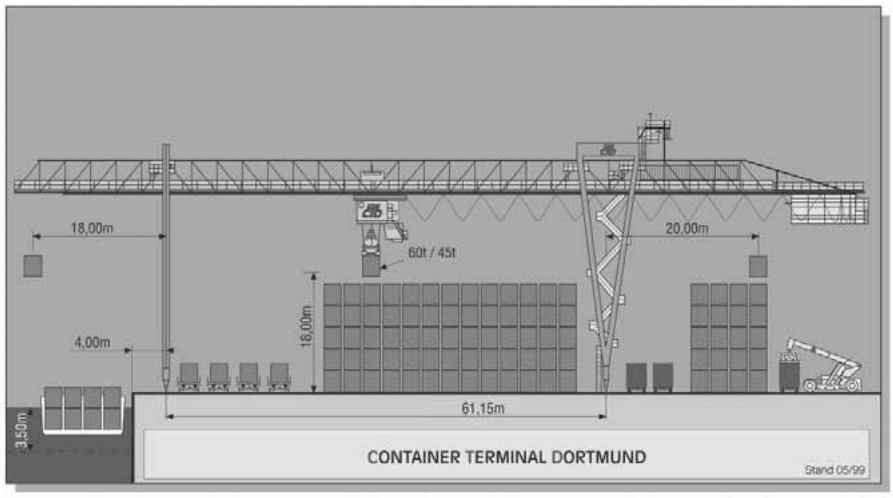


Abbildung 1: *Containerumschlag in einem Binnenhafencontainerterminal*

Aus diesem Grund ist die Krananlage in Binnenhafencontainerterminals als hauptwertschöpfendes Umschlagselement anzusehen und birgt somit hohe Potentiale zur Verbesserung der gesamten Umschlagsleistung eines Binnenhafencontainerterminals.

Stahlbock und Voss (2007) und Steenken et al. (2004) geben in ihren Arbeiten einen Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung bezüglich der Optimierung des Umschlagbetriebs in den einzelnen Teilbereichen eines Containerterminals. Sie beschreiben in ihren Arbeiten Optimierungsansätze bezüglich der Planung der Depotfläche, der Zuordnung von Schiffen zu den einzelnen Liegeplätzen, der Kransteuerung sowie der innerbetrieblichen Transportplanung. Meisel und

Wichmann (2010) haben eine Containerreihenfolgeplanung speziell für Kaikrane entwickelt und Jung und Kim (2006) beschreiben einen Ladereihenfolgealgorithmus für Kaikrane in Seehafencontainerterminals. Die beschriebenen Verbesserungsansätze beziehen sich ausschließlich auf Seehafencontainerterminals und eine Adaption auf Binnenhafencontainerterminals ist aufgrund der unterschiedlichen Arbeitsweise in den Terminals nicht ohne weiteres möglich. Gambardella et al. (2001) beschreibt einen Ansatz zur Reihenfolgeplanung von Be- und Entladevorgängen in einem bimodalen Hinterlandterminal. Dieser Ansatz betrachtet jedoch, wie auch die vorher genannten, lediglich Verbesserungen in Teilbereichen eines Containerterminals und haben keine gesamtbetriebliche Verbesserung des Umschlagbetriebs als Ziel.

In diesem Beitrag wird eine von den Autoren entwickelte Kransteuerung mittels einer Auftragsreihenfolgeplanung mit Prioritätskennzahl beschrieben. Ziel dieser Kransteuerung ist die ganzheitliche Verbesserung der Umschlagsleistung und –effizienz und somit des Umschlagbetriebs eines Binnenhafencontainerterminals. Canonaco et al. (2007) beschreiben die Simulation als eine Methode, die es ermöglicht, ein logistisches Gesamtsystem mit allen stochastischen Einflüssen der Teilbereiche zu verbessern. Aus diesem Grund wurde die entwickelte Kransteuerung als Baustein in eine Simulationsumgebung für Binnenhafencontainerterminals integriert. Die Funktionalität und das Verbesserungspotential der Kransteuerung wird anhand einer durchgeführten Fallstudie eines existierenden Containerterminals nachgewiesen.

2 Steuerung von Umschlagvorgängen

Die Krananlage in Binnenhafencontainerterminals ist, wie in Abschnitt 1 dargestellt, das hauptwertschöpfende Umschlagelement. Eine ständige Verbesserung der Umschlagsleistung ist somit ein von jedem Terminalbetreiber anzustrebendes operatives Betriebsziel. Hierzu existieren Standardverfahren zur Bestimmung der Reihenfolge der Umschlagsaufträge. Dies sind sowohl eine Abfertigung der Umschlagsaufträge nach dem FiFo Prinzip, bei dem der Auftrag mit der längsten Wartezeit als nächstes umgeschlagen wird, als auch eine Next Best Abfertigung nach dem kürzeste Wege Prinzip, bei dem immer der von der aktuellen Position aus gesehene am nächsten gelegene Transportbehälter umgeschlagen wird. Die Anwendung dieser Verfahren verbessern jedoch immer nur ein einziges Leistungsziel und erreichen somit keinen optimalen Gesamtterminalbetrieb. Um diesem Ziel möglichst nahe zu kommen, wurde eine mathematische Optimierungsheuristik, eine Kransteuerung mittels einer Auftragsreihenfolgeplanung mit Prioritätskennzahl, entwickelt. Hierzu wurde die von Lampe (2006) für ein Ein-Kran-Modul in einem bimodalen KV-Terminal entwickelte Auftragsreihenfolgeplanung für ein Mehr-Kran-Modul in einem trimodalen Containerterminal weiter entwickelt. Die Kransteuerung von Lampe (2006) wurde in einer Voruntersuchung bestehender Lösungsansätze als die im Vergleich zu Kim (2006) und Gambardella et al. (2001) am besten geeignete Kransteuerung befunden. Die entwickelte Kransteuerung ermöglicht einem Terminalbetreiber, die Umschlagsleistung im Containerterminal genau nach seinen Anforderungen zu verbessern.

Es existiert eine Vielzahl an Anforderungen an einen optimalen Terminalbetrieb. Neben den Betriebsanforderung, wie z.B. kürzeste Leer- und Lastfahrten, sind dies Marktanforderungen, wie bspw. kurze Wartezeiten der Verkehrsmittel, Einhaltung der Fahrpläne oder möglichst kurze Verweilzeiten von LKW auf dem Gelände. Nur so kann sichergestellt werden, dass Spediteure auch weiterhin das Terminal nutzen. Diese Anforderungen können von Terminal zu Terminal unterschiedlich sein, so dass eine Methode entwickelt wurde, die von jedem Terminalbetreiber exakt auf seine Bedürfnisse eingestellt werden kann. Die Auftragsreihenfolgeplanung mittels Prioritätskennzahl beschreibt für jeden Umschlagsauftrag den Eignungsgrad des Auftrages, als nächstes umgeschlagen zu werden. Der Auftrag mit der höchsten Eignung wird vom Kran als nächstes umgeschlagen. Die Berechnung erfolgt über den Term:

$$P_k = \left(\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot g_i \right) \prod_{j=1}^{m} ex_j$$

$$\begin{aligned} &k \in \text{Umschlagsauftrag}; \\ &p_i \in [0,1] \\ &ex_j = \begin{cases} 1, \text{ wenn kein Ausschlusskriterium auftritt} \\ 0, \text{ wenn ein Ausschlusskriterium auftritt} \end{cases} \end{aligned} \tag{1}$$

Die Prioritätskennzahl P_k für einen Umschlagsauftrag k ist zusammengesetzt aus der Summe der Prioritätsparameter p_i für jede Unternehmens- und Marktanforderung i, die für einen Terminalbetreiber relevant ist und ihrer individuellen Gewichtung g_i. Damit eine bessere Vergleichbarkeit erzielt werden kann und verhindert wird, dass eine Anforderung die anderen Anforderungen aufgrund ihrer Ausprägung dominiert, wird bei der Berechnung der Prioritätsnummer die Ausprägung einer Anforderung i normiert, d.h. sie wird mit der maximal vorkommenden Ausprägung der Anforderung i ins Verhältnis gesetzt. Somit ist die höchste Ausprägung einer Anforderung i gleich 1 und die niedrigste größer gleich 0.

Zusätzlich hierzu sind noch Ausschlusskriterien ex_j, hinzugefügt, die verhindern, dass ein Auftrag ausgewählt wird, der noch nicht bereit für einen Umschlag ist. Dies kann bspw. der Fall sein, wenn sich der Transportbehälter innerhalb eines Containerstapels befindet und dementsprechend vorher noch andere Container umgelagert werden müssen oder wenn eine Kollision mit einem anderen Kran bei der Durchführung des Auftrages entstehen würde. Greift ein Ausschlusskriterium ist dieses gleich 0, was dazu führt, dass die gesamte Prioritätskennzahl gleich 0 ist. Ein Umschlagsauftrag mit einer Prioritätskennzahl gleich 0 wird grundsätzlich nicht umgeschlagen.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren verfolgt das Prinzip der Online Optimierung. Dies bedeutet, dass mit jeder Zustandsänderung des Systems, für jeden Umschlagsauftrag die Prioritätskennzahl neu berechnet wird und somit immer eine aktuell beste Lösung ermittelt. Zustandsänderungen sind bspw. das Hinzufügen

eines neuen Auftrages aufgrund der Ankunft eines neuen Transportmittels oder das Beenden eines Umschlagvorgangs und die damit verbundene neue Position des Krans.

3 Simulationsumgebung CONTSIM

Die in Abschnitt 2 vorgestellte Optimierungsheuristik wurde, zusammen mit den ebenfalls in Abschnitt 2 erläuterten Standardberechnungsverfahren, als Steuerungselement in die am Institut für Transportlogistik der TU Dortmund entwickelte Simulationsumgebung CONTSIM implementiert.

3.1 Generierung von Eingangsdaten

Um eine Simulationsstudie durchführen zu können müssen Daten in das Simulationsmodell eingefügt werden. Es werden hierbei Daten über das Verhalten der Transport- und Umschlagmittel sowie der Ladeeinheiten, den Systemlastdaten, benötigt. Diese Systemlastdaten beschreiben bspw. die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Transportmittel geben an, wie viele Ladeeinheiten ein Transportmittel bringt und abholt oder wie die Ladeeinheit beschaffen ist.

Die Simulationsumgebung ermöglicht hierbei den Einsatz von zwei unterschiedlichen Datenquellen. Auf der einen Seite ist es möglich, Echtzeitdaten der Systemlast des zu beschreibenden Terminals zu nutzen. Diese Daten ermöglichen es, ein genaues Abbild der Vergangenheit zu erhalten, das zu untersuchende Terminal genau abzubilden und somit das Simulationsmodell zu validieren. Des Weiteren sind so Soll-Ist-Vergleiche von neuen Betriebsszenarien und dem aktuellen Betrieb möglich. Auf der anderen Seite ist es zusätzlich notwendig, veränderte Systemlasten zu benutzen, um Zukunftsszenarien oder Grenzleistungsbetrachtungen durchzuführen. Hierfür wurde ein Datengenerator entwickelt, welcher basierend auf abgeleiteten Verteilungen und Eingangsparametern neue Inputdatensätze generiert. Das Ziel des Datengenerators ist es, einen realistischen, LKW basierenden Fahrplan zu erzeugen. Dieser hat die Form: LKW x liefert Container y zur Zeit z. Dieser wird d Tage später von einem Schiff oder Zug abgeholt (oder andersherum). Hierbei werden folgende Eingangsdaten berücksichtigt:

- Der Fahrplan der Schiffe und Züge,
- Statistische Verteilung der Lagerdauer der unterschiedlichen Containertypen,
- Statistische Verteilung der LKW Ankunftszeiten,
- Statistische Verteilung der leeren und vollen Container, sowie der Containertypen,
- Durchschnittliche Auslastung der Schiffe und Züge und
- Möglichkeiten des Doppelhandlings von Fahrzeugen. Wie oft bringt und holt ein Fahrzeug Container gleichzeitig.

Aus diesen Informationen wird im Datengenerator eine Tabelle wie in Tabelle 1 dargestellt erzeugt.

Der Datengenerator beginnt bei den exakten Informationen und erzeugt seine Daten Stück für Stück aus den statistischen Informationen.

Tabelle 1: *Beispiel eines Fahrplans für LKW*

LKW	Typ	Container-nummer	Container-typ	Transport Datum	Gate In	Train/ ship out: date	Train/ ship out: time
TR 5454	Full Out	T_Out 35	40	18.03.	09:33	01.04.	06:00

Für jedes Schiff bzw. jeden Zug ist das Vorgehen dabei wie folgt:

1. Die ein- und ausgehende Ladung wird anhand der gegebenen Verteilungen und Auslastungen erzeugt. Wir haben nun also eine Menge an „virtuellen Containern", die zu einer gegebenen Zeit eingeliefert bzw. abgeholt werden.
2. Nun wird zu jedem Container ein LKW erzeugt, der diesen abholt bzw. bringt. Dabei richten wir uns nach den Verteilungen für Ankunftszeiten und Lagerdauern der Container.
3. Eventuelle Anpassungen (ein- und ausgehende Lieferung durch denselben LKW etc.) werden vorgenommen.

Auf diese Weise werden Musterwochen erzeugt, die eine realistische Simulation und damit auch realistische Vorhersagen ermöglichen.

3.2 Elemente der Simulationsumgebung

Die Simulationsumgebung CONTSIM ermöglicht die Abbildung von Containerterminals in einem experimentierbaren Computermodell. Ein solches Simulationsmodell bildet den gesamte Material- und Informationsfluss eines Containerterminals mit allen relevanten Ressourcen, Teilprozessen und Betriebsstrategien ab.

Die Systemgrenzen der Simulationsumgebung sind der Gleisanschluss an der Terminalgrenze, die Kaimauer und die Ein- und Ausfahrt des Terminals. Alle im Simulationsmodell nachgebildeten Aufträge werden entweder durch durch den Gebrauch von Echtzeitdaten oder mit dem entwickelten Datengenerator erzeugt. Nach Voß (2007) besteht die typische Struktur eines Containerterminals aus wasserseitigen- und landseitigen Ladestellen, zwischen denen der Materialfluss stattfindet. Dementsprechend haben alle Aufträge entweder ein Binnenschiff, einen Waggon oder ein Straßenfahrzeug als Startort und ebenfalls ein Binnenschiff, einen Waggon oder ein Straßenfahrzeug als Zielort.

Die Simulationsumgebung wurde in der Simulationssoftware Enterprise Dynamics der Firma INCONTROL Simulation Solutions entwickelt und basiert auf der Logistics Suite der Software. Diese umfasst sowohl Infrastruktur- und Suprastrukturbausteine als auch Fahrzeuge, Ladeeinheiten und Steuerungselemente. Diese können den Anforderungen entsprechend in der Größe und in ihren Betriebsparametern (Geschwindigkeiten, Anzahl Mitarbeiter, usw.) eingestellt werden. Infrastrukturbausteine beinhalten die Kaimauer als Ladestelle für Schiffe, Gleise als Ladestellen für Züge und Straßen als Verkehrswege auf dem Terminal

und Ladestellen für LKW. Bausteine für die Suprastruktur sind die Gebäude (bspw. Pforte, Administration), die Lagerplätze für Container und die stationären, nicht frei verfahrbaren Umschlagmittel. Diese sind die Krananlagen zum Umschlag der Container, welche entweder als Kaikrane oder als Stapelkrane eingesetzt werden. In Binnenhafenterminals werden die Krane in der Regel als alleiniges Umschlagmittel genutzt, welches sowohl die wasserseitigen als auch die landseitigen Operationen durchführt. Der Kranbaustein der Simulationssuite kann hierfür genutzt und speziell auf den Einsatzzweck parametrisiert werden. Fahrzeuge werden als einzelne Objekte abgebildet und bewegen sich selbständig im Modell. Fahrzeuge können Schiffe, Züge und LKW sowie frei verfahrbare Flurfördermittel, wie z.B. Reach Stacker, sein. Als Ladeeinheiten sind Container in den Größen 20-Fuß bis 45-Fuß sowie Wechselbehälter und Sattelauflieger abbildbar. Als Sonderformen sind Container als Kühl- oder Gefahrgutcontainer parametrisierbar. Die Simulationssuite wird mittels zweier Konzepte gesteuert. Auf der einen Seite erfolgt die Steuerung der Umschlagmittel dezentral über die einzelnen Umschlagmittel. Auf der anderen Seite werden die Verkehrsmittel und der Lagerbereich zentral über den Strategiebaustein gesteuert. Bei der dezentralen Steuerung der Umschlagmittel wählt diese entweder nach den in Abschnitt 2 aufgezeigten Standardberechnungsverfahren aus oder ermittelt den am besten zum Umschlag geeigneten Auftrag mit Hilfe der in Abschnitt 2 erläuterten Auftragsreihenfolgeplanung. Das zentrale Steuerungselement bestimmt, welche Ladestellen innerhalb des Umschlagterminals vom Verkehrsmittel angefahren werden. Des Weiteren bestimmt das zentrale Steuerelement, wo eine Ladeeinheit im Lagerbereich eingelagert wird. Hierbei können unterschiedliche Lagerstrategien für die Zoneneinteilung (Premarshalling Stacking, Scattered Stacking, Free Stacking) und Stapelselektion (Category Stacking, Residence Time Stacking, Random Stacking) eingesetzt werden.

4 Anwendungsfall

Die Simulationssuite wurde in einem Anwendungsfall eines typischen Binnenhafenterminals dazu eingesetzt, den Vorteil der vorgestellten Auftragsreihenfolgeplanung gegenüber dem bisherigen Umschlagverfahren beim Umschlagbetrieb des untersuchten Containerterminals darzustellen. Beim bisherigen Umschlagbetrieb bestimmten die Kranfahrer des Containerterminals weitestgehend selbst, welche Ladeeinheiten sie als nächstes umschlagen. Hierbei waren sie immer darauf bedacht, den räumlich am nächsten zur aktuellen Kranposition befindlichen Container anzufahren. Lediglich zu fahrplanmäßigen Abfahrtzeitpunkten von Verkehrsmitteln wurden Container, welche noch auf das oder von dem abfahrenden Verkehrsmittel umgeschlagen werden mussten, priorisiert behandelt. Mit Hilfe der Simulation wurde überprüft, ob durch eine Steuerung mittels einer Auftragsreihenfolgeplanung die Umschlagseffizienz und -kapazität gesteigert werden kann. Das hierbei betrachtete Containerterminal ist wie folgt aufgebaut:

- 3 Umschlagskrane auf einem Gleis,
- 1000 Ground Slots im Depot mit einer maximalen Stapelhöhe von 5 Containern und einer Größe von 20 Fuß,
- Ein 4-Gleis-Modul mit einer Länge von 400 Metern zur Be- und Entladung von Zügen,

- Eine Kaimauer mit einer Länge von 400 Metern mit 2 Ladeplätzen für Binnenschiffe,
- 20 Lkw-Ladestellen und
- Umschlag von ca. 1000 Containern pro Tag.

Alle Umschlagsvorgänge in dem Containerterminal werden von den 3 Kranen getätigt. Zur Kollisionsvermeidung und um Behinderungen im Arbeitsablauf zu vermeiden ist jeder Kran einem festen Arbeitsbereich zugeordnet, in dem er operiert. Um Deadlock Situationen zu vermeiden überlappen sich diese Arbeitsbereiche an den Grenzen zueinander um jeweils 4 Ground Slots. In diesen Bereich werden Container von einem Kran an den anderen Kran übergeben und die Export Container werden dort gelagert. Jeder Arbeitsbereich eines Kranes hat einen eigenen Bereich für Import- und Leercontainer.

Systemlastdaten für die Simulationsstudie wurden aus den realen Vergangenheitsdaten des Containerterminals abgeleitet. Des Weiteren erfolgte eine Aufnahme aller relevanten Layoutobjekte, Umschlagsprozesse und Prozesszeiten vor Ort. Mit Hilfe der Vergangenheitsdaten erfolgte die Abbildung des Ist-Systems im Modell, welches den Ist-Zustand des Containerterminals widerspiegelt. Die 3-D- und 2-D Ansicht des Simulationsmodells ist in Abbildung 2 abgebildet.

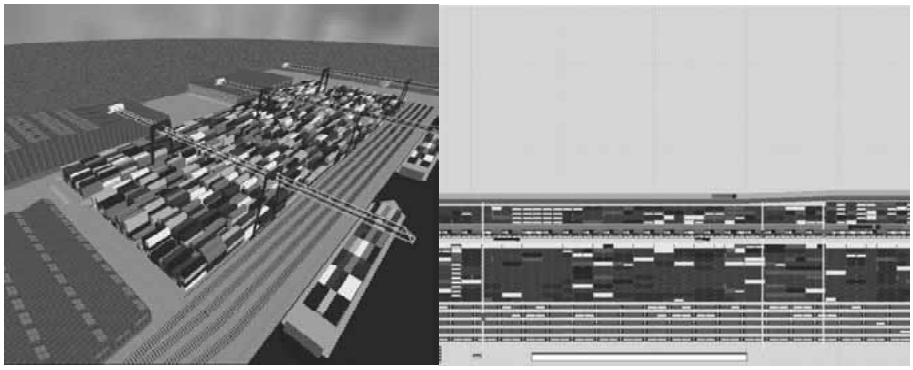


Abbildung 2: *a) 3D und b) 2D Modell des untersuchten Containerterminals*

Die Validierung des Modells erfolgte über die tatsächlichen Leistungskennzahlen des Containerterminals, welche mit den Ergebnissen der Simulation des Ist-Modells verglichen und in Expertenworkshops mit den Fachleuten vor Ort Schritt für Schritt überprüft wurden. Auf diese Weise wurde ein validiertes Simulationsmodell für die weiteren Untersuchungen erzeugt. Darauf aufbauend wurde in einem weiteren Modell die Kransteuerung auf eine Steuerung mittels der Auftragsreihenfolgeplanung mit Prioritätskennzahl umgestellt. Hierbei wurden die in Tabelle 1 Parameter, Gewichtungen und Ausschlusskriterien für die Berechnung der Prioritätskennzahl genutzt.

Der hieraus resultierende Experimenteplan besteht somit aus zwei verschiedenen Umschlagssteuerungsszenarien:

- Next Best und
- Auftragsreihenfolgeplanung mit Prioritätskennzahl.

Diese wurden, zur Vermeidung von statistischen Ausreißern, jeweils 20-mal simuliert. Durch die festen Eingangsdaten und genauer Fahrzeitberechnung der Wege lag das Konfidenzintervall bei sehr hohen 99,78%. Um die Auswirkungen der Steuerungsumstellung zu untersuchen, erfolgte zusätzlich noch eine

***Tabelle 1**: Prioritätsparameter und Ausschlusskriterium mit zugehöriger Gewichtung*

Prioritätsparameter	Gewichtung
Zeit für die Lastfahrt	1
Zeit für die Leerfahrt	2
Wartezeit des Auftrags	2
Cut off	Startet mit 1 und wird alle 30 Minuten um 1 erhöht
Ausschlusskriterium	
Kollision mit einem anderen Kran	0
Kein Direktzugriff auf einen Container möglich	0
Zielverkehrsmittel ist noch nicht entladen	0

Grenzleistungsbetrachtung der beiden Szenarien. Die hierzu verwendeten Inputdaten wurden mit dem in Abschnitt 3.1 erläuterten Datengenerator erzeugt.

5 Ergebnisse

Die Studie hat ergeben, dass die Zeit, die ein LKW an der Ladestelle verbringt, mit Hilfe einer Auftragsreihenfolgeplanung mit Prioritätskennzahl um 6% gesenkt werden kann, was 2 Minuten entspricht. Hierdurch können im Terminal Fahrzeuge abgefertigt werden und als Konsequenz daraus kann die landseitige Umschlagskapazität erhöht werden. Des Weiteren konnte der Umschlagsfaktor um 2,5% gesenkt werden. Der Umschlagsfaktor beschreibt hierbei das Verhältnis von unbezahlten zu bezahlten Umschlagsvorgängen. Ein Containerterminal wird für einen Umschlag von einem Verkehrsmittel auf ein weiteres Verkehrsmittel bezahlt. Alle Umschläge, in die das Depot involviert ist, werden hingegen nicht bezahlt. Bucht der Kunde beispielsweise einen Umschlag einer Ladeeinheit von einem LKW auf einen Zug, dann bezahlt er den direkten Umschlag. Wird die Ladeeinheit jedoch erst in das Depot eingelagert und dann zu einem anderen Zeitpunkt auf den Zug geladen, dann sind alle diesbezüglichen zusätzlichen Umschläge unbezahlt. In Binnenhafencontainerterminals werden die Ladeeinheiten zeitlich von dem Hauptlaufverkehrsmittel entkoppelt angeliefert und abgeholt, so dass ein doppelter Umschlag die Regel ist. Aus diesem Grund ist bei direktem Umschlag der niedrigste Umschlagsfaktor 1. Die Absicht eines Containerterminalbetreibers ist es, so nah wie möglich an den Faktor 1 heranzukommen und somit unproduktive Umlagervorgänge im Depot zu vermeiden. Die Reduktion des Umschlagsfaktors in dem vorgestellten Anwendungsfall um 2,5% bedeutet eine Reduzierung der Umlagervorgänge von 20 pro Tag, welche zusätzlich für produktive Umschlagsvorgänge genutzt werden

können. Zusätzlich konnte der Anteil von Leerfahrten an den Kranfahrten um 4% gesenkt werden. Die Verbesserungen der Umschlagseffizienz führten dazu, dass es dem Terminalbetreiber möglich wurde die Standzeiten der Züge im Terminal zu senken, die Pünktlichkeit zu erhöhen und somit mehr Züge pro Tag abzufertigen. Dies führte zu einer Erhöhung der Grenzleistung des Terminals um 30%.

6 Fazit und Ausblick

Der vorgestellte Anwendungsfall hat gezeigt, dass eine Steuerung der Umschlagsvorgänge in einem Binnenhafencontainerterminal mittels Auftragsreihenfolgeplanung mit Prioritätskennzahl zu einer Verbesserung der Umschlagseffizienz gegenüber einer Next-Best Strategie führt. Des Weiteren zeigt der Beitrag, dass die Simulation sehr gut geeignet ist, Verbesserungen der Umschlagseffizienz von Binnenhafencontainerterminals zu erreichen. Engpässe im Materialfluss können identifiziert werden und neue Betriebs- und Steuerungsstrategien können in einem experimentierbaren, virtuellen Modell getestet werden, ohne hierfür kostenintensive Realtests durchzuführen.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Simulationsumgebung sowie die gewonnenen Erkenntnisse werden im durch das European Union Seventh Framework Programme unter dem Agreement SCP2-GA-2012-314005 gefördertem Projekt „Development of a Next generation European Inland Waterway Ship and logistics system (NEWS)“ eingesetzt, um für den Einsatz eines neuartigen Containerschiffs die logistischen Anforderungen zu evaluieren und die notwendigen Prozesse in Binnenhafencontainerterminals mittels Simulation zu entwickeln.

Literatur

Canonaco, P.; Legato, P. und Mazza, R.M.: An integrated simulation model for channel contention and berth management at a maritime container terminal. 21st European Conference on Modelling and Simulation, S.353 – S.362, 2007.

Gambardella, L.M.; Mastrolilli, M.; Rizzoli, A.E. und Zaffalon, M.: An optimization methodology for intermodal terminals management. Journal of Intelligent Manufacturing, 12, S.521 – S.534, 2001.

Jung, S.H. und Kim, K.H.: Load scheduling for multiple quay cranes in port container terminals. Journal of Intelligent Manufacturing, 17, S.479 – S.492, 2006.

Lampe, H.: Untersuchung von Dispositionsentscheidungen in Umschlagterminals des kombinierten Verkehrs Straße/Schiene. Doktorarbeit, TU Dortmund University, 2006.

Lee, W. S.; Ottjes, J. A.; Veeke, H.P.M. und Rijsenbrij, J.C.: Using container call time information for restacking reduction. Industrial Simulation Conference, S.293 – S.298, 2008.

Meisel, F. und Wichmann, M.: Container sequencing for quay cranes with internal reshuffles. OR Spectrum, 32, S.569-S.591, 2010.

Stahlbock, R. und Voß, S.: Operations research at container terminals – A literature update. OR Spectrum; online http://www.springerlink.com/content/018j57r4364148m0, 2007.

Steenken, D.; Voß, S. und Stahlbock, R.: Container terminal operation and operations research – a classification and literature review. OR Spectrum, 26, S.3 – S.49, 2004.

Voß, S.: Container terminal operation and operations research – recent challenges. Proceedings of the 12th international Conference of Hong Kong Society for Transport Studies – Transportation Systems: Engineering & Management, S.387 – S.396, 2007.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Effiziente und flexible Modellierung der Logistik an Bord von Schiffen und in Gebäuden

Efficient and Flexible Modelling of Logistics on Board of Ships or in Buildings

Dirk Steinhauer, Michael Soyka,
Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Flensburg (Germany),
steinhauer@fsg-ship.de, soyka@fsg-ship.de

Michael Hübler, Center of Maritime Technologies e.V.,
Hamburg (Germany), huebler@cmt-net.org

Abstract: Efficient and effective logistics on board of ships gets more and more important for shipyards and ship owners to increase the product's functionality. Though, depending on the product type logistical processes on board of ships or in buildings may get very complex. This paper describes a concept for modelling these processes in order to do simulation analysis developed by two shipyards and a research institute within the European research project BESST. The development was harmonized in the interbranch cooperation SIMOFIT in order to cover requirements from civil engineering for buildings as well. The concept is based on simulation tools already applied at the partners for various purposes. It contains a concept for the software architecture, a hierarchical volume concept and methods for transport management. The concept was successfully validated at the partners on different ship types.

1 Einleitung

Eine effiziente und effektive Logistik an Bord von Schiffen wird für die Werften und Reeder immer wichtiger, um sich auf dem immer stärker unter Druck stehenden Markt gegenüber der Konkurrenz durchzusetzen. Da über den Preis des Produktes die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Werften nicht erreicht werden kann, muss die Produktfunktionalität gemeinsam mit dem Kunden entwickelt werden. Dabei spielt bei einer Reihe von Schiffstypen auch die Logistik an Bord eine entscheidende Rolle.

Die simulative Analyse und Bewertung von Logistikprozessen an Bord von Schiffen zu einem frühen Zeitpunkt des Entwicklungs- und Bauprojektes ist aus zweierlei Gründen wichtig: Zum einen muss frühzeitig schon in der Entwurfsphase die logistische Funktionsfähigkeit des Schiffes abgesichert werden, wenn z. B.

Proviantierung und Versorgung an Bord des Schiffes gewährleistet werden muss. Dazu ist es erforderlich, in der Entwurfsphase unterschiedliche Layoutalternativen zu bewerten, welche sich im Verlauf des Entwurfsprozesses dann auch beständig ändern können. Zum anderen wird das Bauprojekt besonders in der Ausrüstungs- und Einrichtungsphase in besonderem Maße durch die logistischen Randbedingungen bestimmt.

Die Logistik an Bord von Schiffen kann sehr komplex werden, da die umfangreichen Serviceprozesse – wie z.B. Lagerung und Verteilung von Verbrauchsgütern - auf möglichst engem Raum stattfinden müssen, um die Lebenszykluskosten gering zu halten und den entstandenen Platz für gewinnbringende Bereiche nutzen zu können. Im maritimen Bereich stellen in diesem Zusammenhang besonders Passagierfähren und Kreuzfahrtschiffe eine große Herausforderung bei der Bewertung der internen Logistik dar. Gleichzeitig ist bei diesen Schiffstypen die Notwendigkeit für eine intensive Analyse der Logistik an Bord besonders hoch, weil von ihr die Funktionsfähigkeit und der Komfort der Schiffe in besonderem Maße abhängen.

Einen erheblichen Teil der Logistik an Bord von Schiffen und in Gebäuden bildet der Transport von unterschiedlichen Gütern durch eine Anordnung von Räumen. Dabei können unterschiedliche Transportmittel zum Einsatz kommen, unter Umständen ist auch ein Wechsel der Transportmittel notwendig. Zudem können Transportsysteme wie Aufzüge oder Kräne in die Transportkette integriert sein. Die Ermittlung von geeigneten Routen durch die Räume ist ein zentraler Punkt in der Logistik, da in der Regel mehrere Wege zum Ziel führen, welche allerdings – unter Umständen sogar situationsabhängig – unterschiedlich zu bewerten sind. Des Weiteren sind die Verfügbarkeit von Übergängen zwischen Räumen und die Durchgängigkeit von Räumen – besonders in der Bauphase – nur temporär oder für bestimmte Arten von Transportmitteln gewährleistet.

Eine wesentliche Randbedingung für das entwickelte Modellierungskonzept ist der Einsatzzeitpunkt in der frühen Projektphase insbesondere zur simulativen Bewertung der logistischen Funktionsfähigkeit. In dieser Phase sind Daten zum Schiff bzw. zum Gebäude nur in geringem Umfang verfügbar, und die für die Modellierung zur Verfügung stehende Zeit ist sehr knapp, weil aufgrund der logistischen Bewertung gegebenenfalls auch eine Anpassung des Entwurfs erfolgen soll. Aus diesen Gründen muss sich das Modellierungskonzept direkt auf die Daten von Entwurfssystemen stützen, und die Modellerstellung sollte möglichst aufwandsarm erfolgen.

Im Rahmen des EU-Vorhabens BESST (Breakthrough in European Shipping and Shipbuilding Technologies) wurde im Arbeitspaket Optimized Onboard Logistics in einem Verbund aus zwei Werften und einer Forschungseinrichtung ein Konzept zur effizienten Modellierung von Logistikabläufen an Bord von Schiffen entwickelt. Basis für das Konzept war die Gesamtarchitektur zur Simulation bestehend aus den individuellen Schnittstellen der Werften zu den eingesetzten Entwurfs- und Konstruktionssystemen, einer Datenbank für die benötigten Simulationsdaten, einem Editor für die Daten und der jeweiligen Simulationsumgebung. Die hier beschriebenen Arbeiten in BESST wurden mit Mitteln der Europäischen Gemeinschaft aus dem siebten Rahmenprogramm (FP/2007-2013) unter der Grand Agreement Nummer 233980 gefördert (BESST 2013).

Basis für das Modellierungskonzept waren existierende Simulationslösungen bei den Projektpartnern, welche inzwischen nicht nur im Schiffbau ihre Anwendung finden. Daher war die universelle Einsetzbarkeit des Modellierungskonzeptes eine wesentliche Zielsetzung bei der Entwicklung. Da die Logistik an Bord von Schiffen große Ähnlichkeit zu derjenigen innerhalb von Gebäuden aufweist, wurde die Konzeptentwicklung mit Kooperationspartnern aus dem Bauwesen abgestimmt. Bereits 2004 wurde aufgrund der Ähnlichkeit in den Problemstellungen bei der Inneneinrichtung von Gebäuden und Schiffen die branchenübergreifende Kooperationsgemeinschaft SIMoFIT gegründet (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering), in der Simulationsfunktionalitäten in Hinblick auf einen Einsatz innerhalb beider Branchen weiterentwickelt werden.

Während im Bauwesen bereits Simulationsanwendungen für die Vorgänge während der eigentlichen Errichtungsphase des Bauwerkes existieren (Voigtmann und Bargstädt 2008), so fokussiert das vorgestellte Konzept auf eine zeitnahe Modellerstellung schon während der Entwurfsphase, um in kürzester Zeit verschiedene Logistikalternativen bewerten zu können. Äquivalente Anwendungsfälle des Konzepts zum Schiffbau im Bereich von Gebäuden sind Hotels oder Krankenhäuser, in denen die Raumanordnung einen großen Einfluss auf deren logistische Leistungsfähigkeit hat. Im Bereich des Gesundheitswesens gibt es bereits verschiedene Ansätze zur Modellierung der Logistikkapazitäten, hier werden jedoch eher auf Basis vorhandener Gebäude feste Modelle erstellt (Mes und Bruens 2012).

2 Modellierungskonzept

Das Ziel des Konzeptes war die effiziente Modellierung der logistischen Abläufe in Bauwerken unter Verwendung von unternehmensspezifischen Datenquellen und mit der Anbindung an bereits bestehende Simulationsfunktionalitäten. Als Bauwerke werden in diesem Kontext die jeweils relevanten Produkte bezeichnet, bei Werften sind dies Schiffe oder Teile davon und im Bauwesen Gebäude aller Art.

Das Konzept zur Simulation der Logistikabläufe soll in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus des Bauwerks zum Einsatz kommen. Zum einen soll der Entwurfsprozess dahingehend unterstützt werden, dass Produktvarianten aus logistischer Sicht bewertet werden, zum anderen sollen die späteren Ausrüstungs- und Einrichtungsprozesse unter Berücksichtigung der Logistik simuliert und bewertet werden. Zudem sollen Planungs- und Steuerungsvorgänge bei der späteren Nutzung des Bauwerks unterstützt werden können.

An dem Konzept haben im Rahmen des Vorhabens BESST drei Partner gearbeitet, deren jeweils unterschiedliche Randbedingungen des Entwurfs und des Simulationseinsatzes Berücksichtigung finden mussten:

- Meyer Werft GmbH (MW)
- Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG (FSG)
- Center of Maritime Technologies e.V. (CMT)

Darüber hinaus wurde das Konzept bei den regelmäßig stattfindenden Kooperationstreffen der SIMoFIT-Gemeinschaft mit den Partnern aus dem Bauwesen abgestimmt.

Während bei der Meyer Werft das selbst entwickeltes ‚Simulationstoolset' zum Einsatz kommt, wird bei der FSG und dem CMT der Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) eingesetzt (Steinhauer 2011), welcher in verschiedenen, auch branchenübergreifenden Kooperationen mit anderen Unternehmen und Universitäten entwickelt und genutzt wird. Obgleich die beteiligten Partner unterschiedliche Simulationsbausteinkästen im Einsatz haben, verwenden doch alle die Basissoftware Plant Simulation von Siemens PLM.

Das Konzept für die Simulation von Logistikprozessen in Bauwerken umfasst

- die Softwarearchitektur,
- das Modellierungskonzept für das Bauwerk sowie
- das Konzept zur Modellierung der Transportvorgänge.

2.1 Softwarearchitektur

Bei der Untersuchung der erforderlichen Module für die Modellierung der Logistik innerhalb von Bauwerken wurden folgende Entwicklungsziele herausgestellt:

- Schnittstellenmodule zu den Entwurfswerkzeugen (im Bereich Schiffbau umfasste dies die Softwareprodukte NAPA und NUPAS)
- Datenmodell in einer SQL-Datenbank, welches in Bezug auf das Entwurfswerkzeug neutral ist
- Editor zur Datenbank, mit dem Daten gemäß den Anforderungen modifiziert werden können
- Neue Simulationsbausteine und Anpassung bestehender an die neuen Erfordernisse auf Basis der eingesetzten Simulationsbausteinkästen der Partner

Die Strukturierung der Daten zu einem neutralen Datenmodell bot trotz unterschiedlicher Entwurfswerkzeuge und zweier unabhängiger Bausteinkästen die Möglichkeit, den größten Teil des Konzeptes in allen an der Entwicklung beteiligten Unternehmen umzusetzen.

Den Aufbau und die Schnittstellen des Gesamtkonzeptes zeigt Abbildung 1. Eine zentrale Rolle nimmt die SQL-Datenbank [B] ein, in der u.a. die Daten von Bauwerk und Warenströmen vorgehalten werden. Die Bauwerksdaten werden aus einem Entwurfs-/Konstruktionswerkzeug [A] mittels Schnittstellenbausteinen exportiert und konvertiert. Es ist daher möglich, Daten zeitnah vom Entwurf in die Simulation zu übertragen, um schnell Aussagen über die logistische Leistungsfähigkeit der betreffenden Entwurfsvariante treffen zu können. Daten über die zu transportierenden Güter können mittels Importfunktionen aus anderen Datenbanken oder Datenquellen eingelesen werden.

Über die interaktive Benutzeroberfläche (UI) [C] ist ein Benutzer in der Lage, verschiedene Versionen eines Bauwerkdatensatzes zu erzeugen und anschließend gemäß den Anforderungen der Simulationsstudie zu modifizieren. Hier können zum Beispiel Datensätze verschiedener Innenraumanordnungen erstellt werden, indem Räume in ihren Abmessungen und an ihren Durchgängen verändert werden.

Die auf diese Weise erzeugten Daten können schließlich mit Hilfe eines weiteren Schnittstellenbausteins in ein Simulationsmodell [D] gelesen werden. In dem Modell werden das Bauwerk und die zu transportierenden Waren gemäß den Datenvorgaben erzeugt, anschließend werden die erforderlichen Transporte durchgeführt. Nach der Durchführung der Simulationsexperimente werden die Ergebnisdaten zurück in die

SQL-Datenbank übertragen. Hier kann mittels der UI ein Vergleich verschiedener Logistikalternativen vorgenommen werden.

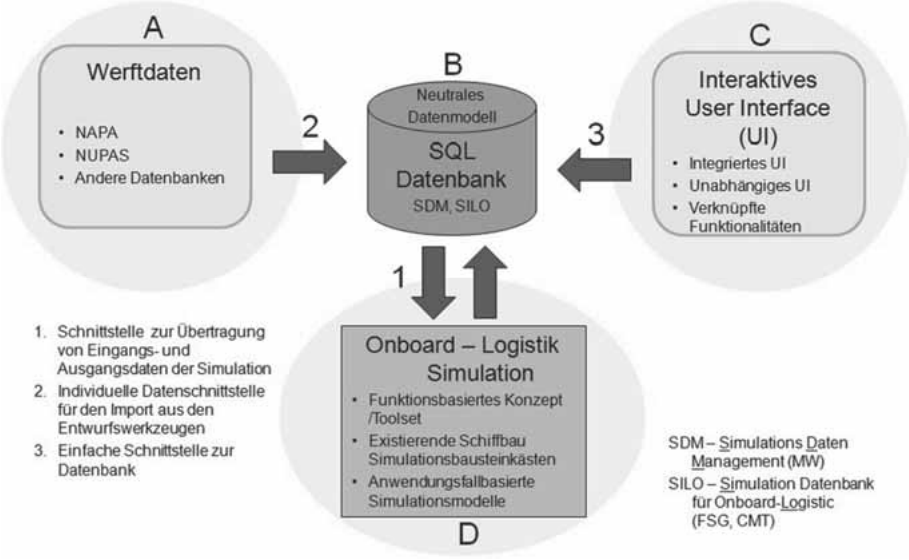


Abbildung 1: *Schematischer Aufbau des Simulationskonzeptes*

2.2 Bauwerksbeschreibung mit Hilfe des Volumenkonzeptes

Beim Entwurf und bei der Konstruktion wird ein Schiff in hierarchisch angeordnete Elemente unterteilt, zum Beispiel in Decks, welche wiederum Zonen enthalten, in denen schließlich die einzelnen Räume angeordnet sind. Bei Gebäuden erfolgt in der Regel eine ähnliche Strukturierung, zum Beispiel mittels der Begriffe Gebäude, Stockwerk, Brandabschnitt und Raum. Um dieser Art der Produktbeschreibung Rechnung tragen zu können, wurde für die Übertragung des Bauwerks in das Simulationsmodell ein hierarchischer Ansatz verwendet. Die das Bauwerk beschreibende Volumenstruktur wird dabei aus der SQL-Datenbank in das Simulationsmodell gelesen.

Jede Hierarchieebene besteht aus einer beliebigen Anzahl von Volumina, die in ihren Abmessungen und ihrer Position definiert worden sind. Jedes Volumen verfügt über Schnittstellen, mit denen Verbindungen zu anderen Volumina (z.B. eine Tür oder ein Durchgang) hergestellt werden können. Jede dieser Schnittstellen verfügt über Eigenschaften, welche zum Beispiel ihre Position im Volumen, die Größe des Übergangs oder die Direktionalität festlegen. Weitere Eigenschaften der Schnittstellen können die Passierbarkeit für bestimmte Transporte limitieren. So kann beispielsweise modelliert werden, ob im Durchgang eine Schwelle besteht, über die ein Mensch zwar steigen, ein Hubwagen jedoch nicht rollen kann.

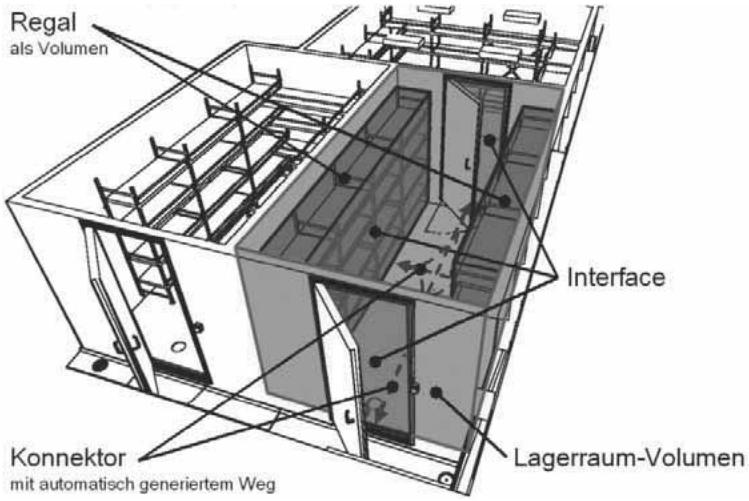


Abbildung 2: *Volumenkonzept am Beispiel eines Lagerraums*

Die Schnittstellen der Volumina können mit Konnektoren verbunden werden (Abb. 2). Auf diese Weise werden die zur Verfügung stehenden Verbindungen zwischen den Volumina definiert. Auch die Konnektoren verfügen über Eigenschaften, mit denen z.B. eine temporäre Verfügbarkeit beschrieben werden kann. Ein Konnektor kann auch über Hierarchieebenen hinweg definiert werden, um beim Übergang von Raum zu Raum auch die höheren Ebenen zu berücksichtigen und gleichzeitig die Kapselung der Volumenobjekte im Sinne der Bauwerkshierarchie sicherzustellen. Des Weiteren können auch (interne) Konnektoren innerhalb eines Volumens definiert werden, welche den Durchgang durch einen Raum beschreiben oder den Weg zu einer integrierten Ressource, wie einem Regal oder Flächenlager, festlegen.

Basierend auf dem Konzept wurden Bausteine entwickelt, welche die Verwaltung der Volumenattribute inklusive Daten der Schnittstellen und Konnektoren übernehmen. Die Konzentration dieser Funktionalitäten und Parameter in einem Modul ermöglicht eine effektive Einführung des Volumenkonzeptes in die Bausteinbibliotheken der beteiligten Unternehmen. Durch Integration eines Bausteines, der die Volumeneigenschaften verwaltet, können daher beide Simulationslösungen in Richtung des vorgestellten Konzeptes erweitert werden.

Im STS wurde der existierende Baustein STS_PropertiesVolume erweitert, der sämtliche Volumeneigenschaften aller Bausteine administriert, in die er integriert wird. Um beliebige Volumina repräsentieren zu können, wurde ein Baustein namens STS_Volume entwickelt. Ausgestattet mit einem STS_PropertiesVolume kann dieser Baustein sowohl als leerer Raum als auch als Container für weitere Bausteine fungieren.

Aufgrund der durchgängigen Administration der Volumeneigenschaften und der damit einhergehenden Funktionalitäten in allen STS-Materialflussbausteinen können diese einfach in das Konzept eingebunden werden. Bausteine, welche beispielsweise einen Fahrstuhl (STS_Lift) oder ein Regalsystem (STS_StorageRack) abbilden, können als Volumina in das Bauwerk integriert werden. Ihre Schnittstellen können

mit denen anderer Volumina über Konnektoren verbunden und die Bausteine so in eine Transportkette integriert werden.

Mit Hilfe eines entwickelten Bausteins zur Modellgenerierung kann ein komplexes Bauwerk, wie zum Beispiel ein Schiff direkt mit den Daten aus der SQL-Datenbank in einem Simulationsmodell erzeugt werden. Die Wege innerhalb der Volumina werden während der Modellerzeugung automatisch generiert. Obwohl das Ziel bei der Konzepterstellung die Modellierung der Logistikabläufe innerhalb eines fertiggestellten Bauwerkes war, so ermöglicht die temporäre Sperrung von Konnektoren genauso einen Einsatz während der Bauphase, in der einzelne Volumen erst nach der Errichtung bestimmter Baufortschritte zugänglich sind.

Abbildung 3 zeigt den Aufbau eines solchen Schiffes aus hierarchisch angeordneten Volumina anhand einer Passagierfähre mit Hilfe des Bausteins STS_ModelGenerator. In diesem Beispiel wurde nur der Teil der Volumina definiert, der für die Entladelogistik von Lieferanten-Lkw in mehreren Lagerräumen notwendig war.

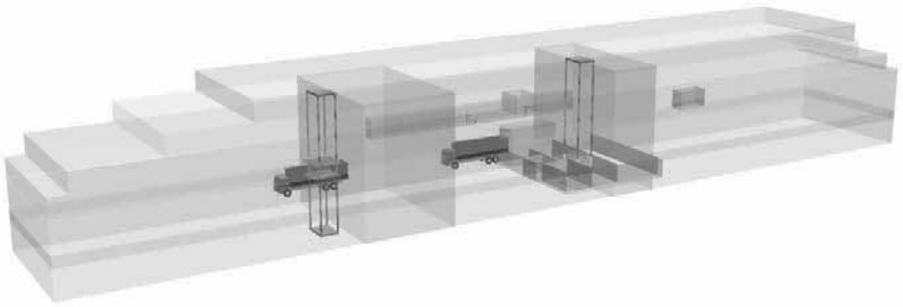


Abbildung 3: *3D-Darstellung eines Beispielmodelles einer Passagierfähre*

2.3 Modellierung der Transporte

Bei der Modellierung der Transporte konnte auf eine Reihe von Funktionalitäten zur Verwaltung von Transportressourcen und zur Durchführung von Transporten zurückgegriffen werden, welche bereits in den sich bei den Partnern im Einsatz befindlichen Bausteinkästen implementiert waren.

Zur Modellierung der Transportprozesse innerhalb der Bauwerke ist es erforderlich, die Transportrouten flexibel und auf Basis von Transportparametern zu ermitteln. Nicht für jedes Transportgut und jedes Transportmittel ist jede Route geeignet. Eine Treppe ist beispielsweise nur für einen Transport durch den Menschen geeignet und manche Türabmessungen erfordern eine Aufteilung eines Warenpaketes in kleinere Einheiten.

Der im Rahmen dieses Konzeptes für den STS entwickelte Routenfindungsbaustein STS_TransportRouter übernimmt im Simulationsmodell die Ermittlung von Routen mit den erforderlichen Eigenschaften für spezifische Transportgüter. Die möglichen Routen werden in einem nächsten Schritt nach unterschiedlichen Kriterien bewertet. Diese Kriterien können statisch sein, wie zum Beispiel Bodenbeschaffenheit oder

Zugänglichkeit, aber auch dynamisch, wie das temporäre Zurückstufen einer überfüllten Route.

Abbildung 4 zeigt verschiedene Routen in einem Beispielmodell, die für einen Transport von einem auf das Fahrzeugdeck einer Passagierfähre gefahrenen Lkw zu einem Lagerraum zur Verfügung stehen. Die beiden Routen durch die Treppenhäuser sind zwar möglich, dort ist die Auswahl der einsetzbaren Transportmittel allerdings eingeschränkt.

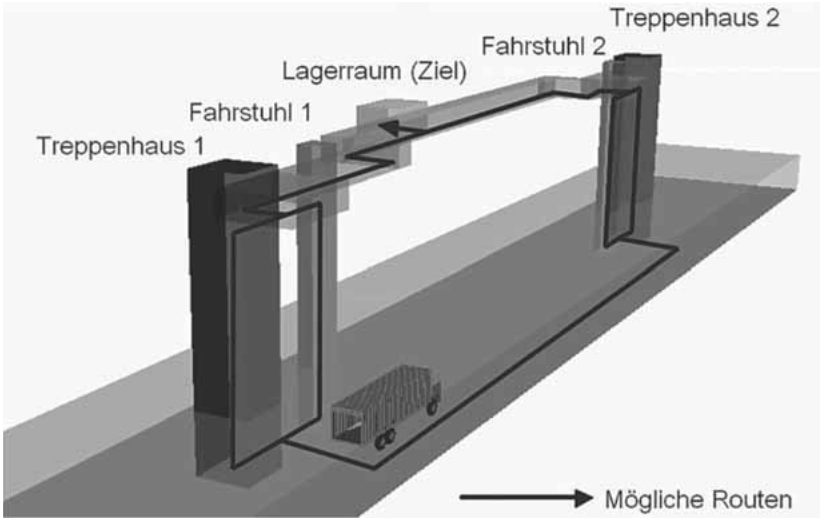


Abbildung 4: *Schematische Darstellung möglicher Routen von Lkw-Laderampe zum Lagerraum*

Bestimmte Transporte erfordern das Umpacken von Waren in kleinere Ladungseinheiten, um bestimmte Bereiche des Bauwerkes erreichen zu können. Hier entsteht ein verketteter Transport, der mit Hilfe eines Verpackungsbausteins (STS_Packaging) und des STS_TransportRouters modelliert werden kann.

3 Validierung des Modellierungskonzeptes

Das Konzept wurde in den Simulationsbausteinkästen der Partner durch Integration neuer Bausteine und Funktionalitäten umgesetzt. Die Erweiterungen im Bereich Modellstrukturierung, Modellgenerierung und Modellbetrieb erlaubten den Testeinsatz des Konzeptes im Rahmen der Analyse der Logistikkapazitäten von einem Kreuzfahrtschiff und einer Passagierfähre.

Die bei der FSG durchgeführte Simulationsstudie zu einer Passagierfähre konzentrierte sich nicht auf die Ladevorgänge der rollenden Ladung, für die bereits eine Simulationslösung existiert (Soyka und Steinhauer 2008), sondern auf die Proviantierung und bordinterne Versorgung. Für den entsprechenden Schiffstyp wurde eine Beladung mit konventionellen Methoden einer Beladung mittels eines im Rahmen eines weiteren Arbeitspaketes von BESST entwickelten Ladekonzeptes mit vorgepackten Containern gegenübergestellt. Beide Beladungsstrategien wurden

hinsichtlich Zeitaufwand und Lebenszykluskosten untersucht. Die Ergebnisse der Simulation flossen in die im Vorhaben BESST durchgeführte durchgängige Bewertung der Lebenszykluskosten für Schiffe ein, welche mit einem im Vorhabensverlauf entwickelten Werkzeug vorgenommen wurde.

Das bisher durchgeführte Logistikkonzept nutzt das Fahrzeugdeck der Fähre als Entladebereich für die Lkw der Lieferanten. Von dort werden die Transportgüter mittels Hubwagen über die Fahrstühle zu den Lagerräumen auf den oberen und unteren Decks verbracht. Da die Fahrstühle zu bestimmten Zeiten einen Engpass bei der Beladung darstellen, werden kleinere Warenpakete gegebenenfalls über die Treppenhäuser transportiert.

Bei dem Container-Konzept wird ein bordgestützter Kran verwendet, um Containereinheiten direkt von der Ladefläche der Lkw in einen Stauraum auf dem oberen Deck zu laden (Abb. 5). Von dort kann die Ladung bei Bedarf im Schiff verteilt werden. Der Großteil der Waren kann jedoch in den Containern verbleiben, bis sie benötigt wird. Da die Container über eigene Kühlsysteme verfügen, kann durch Abschaltung von leeren Containern eine Energieersparnis erzielt werden. Bei Lagerung in einem bordinternen Kühlraum muss die volle Kühlleistung solange erbracht werden, bis der Raum komplett geleert worden ist.

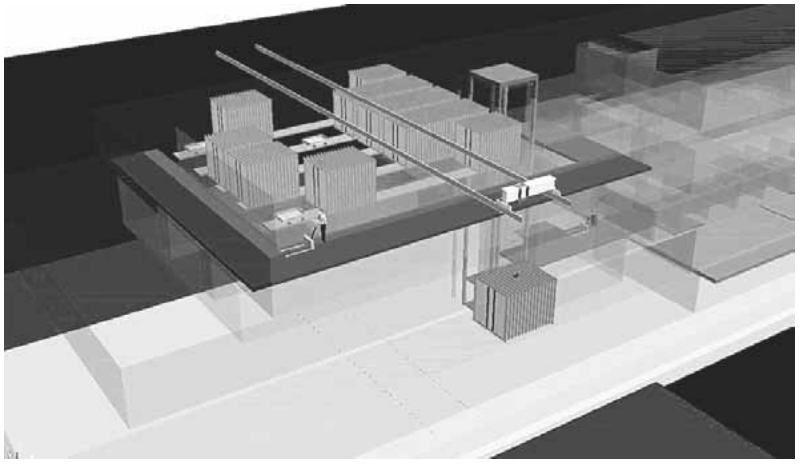


Abbildung 5: *Darstellung der Simulation des Container-Konzeptes*

Mit Hilfe der Simulation lassen sich die Vor- und Nachteile beider Ladesysteme gegenüberstellen, so dass ein Schiffseigner oder -betreiber bei der Entscheidung unterstützt werden kann, welche Logistik für seinen Anwendungsfall die geeignete ist.

4 Fazit und Ausblick

Das beschriebene Konzept zur Simulation von logistischen Prozessen in Bauwerken wurde in die jeweilige Simulation-Infrastruktur der Partner erfolgreich integriert. Die entwickelten Funktionalitäten für die Modellstrukturierung, Modellgenerierung und den Modellbetrieb stehen nun in den Bausteinkästen zur Verfügung. Eingesetzt

werden sie im frühen Entwurf der Schiffe, um das Layout hinsichtlich logistischer Aspekte zu optimieren.

Als nächster Schritt in der Entwicklung der Modellierungsstrategie wird der bisher nur als Demonstrator umgesetzte Editor der Volumendaten weiter entwickelt.

Im Rahmen weiterer Forschungsprojekte wird der Konzeptansatz bereits aufgegriffen und hinsichtlich zusätzlicher Punkte erweitert. Das Center of Maritime Technologies entwickelt in den europäisch geförderten Projekten RETROFIT und GRIP das beschriebene Konzept weiter. Beide Projekte haben zum Ziel, Schiffe nachträglich mit energieeffizienten und emissionsarmen Komponenten auszurüsten. In diesen Vorhaben wird das Volumenkonzept in Richtung temporärer Volumen erweitert. Dies ist für die Umrüstung aber auch für den Neubau interessant, wenn neue Volumen entstehen oder existierende umgebaut werden müssen. Ein weiterer Punkt ist der Ausbau und die Erweiterung des Userinterface mittels Plug-Ins in Richtung eines Planungswerkzeugs.

Nicht nur in den bereits genannten Forschungsprojekten wird eine Weiterentwicklung erfolgen. Zur Anwendung und weiteren Validierung kommt das Konzept auch innerhalb der Simulationskooperationen SimCoMar (Simulation Cooperation in the Maritime Industries) und SIMoFIT. Derzeit werden in der branchenübergreifenden Kooperationsgemeinschaft SIMoFIT weitere Anwendungsgebiete für dieses Modellierungskonzept untersucht.

Literatur

BESST: Breakthrough in European Ship and Shipbuilding Technologies, The BESST Consortium 2013, www.besst.it

Mes, M.; Bruens, M.: A generalized simulation model of an integrated emergency post. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O..; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin (Germany), 09.-12. December 2012, Article No 78.

Soyka, M.; Steinhauer, D.: Simulation logistischer Abläufe an Bord von Schiffen. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Fraunhofer IRB, Stuttgart 2010, S. 91-100.

Steinhauer, D.: The Simulation Toolkit Shipbuilding – 10 Years of Cooperative Development and Interbranch Applications. In: Proceedings of the 10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT), Berlin (Germany), 2011, S. 453-465.

Voigtmann, J.; Bargstädt, H.J.: Simulation of construction logistics in outfitting processes. In: Zarly, A.; Scherer, R. (Hrsg.): eWork and eBusiness in architecture, engineering and construction: proceedings of the 7th European Conference on Product and Process Modelling, Sophia Antipolis (France), 10.-12. September 2008, S.195-203.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Leistungsabstimmung von Montagesystemen auf der Basis von Personaleinsatzgraphen

Balancing of assembly systems based on staff assignment graphs

Thilo Gamber, Michael Leupold, Gert Zülch,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (Germany),
thilo.gamber@kit.edu, michael.leupold@kit.edu, gert.zuelch@kit.edu

Abstract: With regards to methods of assembly systems planning we are familiar with the depiction of the technical structure using capacity fields and capacity graphs in addition to the modelling of assembly activities as a precedence diagrams. However, no form of presentation has yet been defined that describes the assignment of staff within an assembly system. This paper discusses the concept of the so called staff assignment graph used to balance a hybrid assembly system, and in doing so marks a first attempt to close this gap and to develop a more comprehensive planning method. The paper also explains how to evaluate staff assignment graphs, as well as how to automatically derive them from corresponding capacity graphs.

1 Die Problematik der Leistungsabstimmung hybrider Montagesysteme

In Montagesystemen, die traditionell durch einen hohen Anteil manueller Tätigkeiten und die damit einhergehenden hohen Lohnkosten geprägt sind, führt der vorherrschende Konkurrenzdruck unter anderem zu einem vermehrten Einsatz von Automatisierungstechnik (Lotter 1999; zitiert nach Müller 2002). Da eine vollständige Automatisierung meist aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht oder nur sehr aufwändig umsetzbar ist, werden in der Praxis oft hybride Montagesysteme realisiert, die sich sowohl aus manuellen Arbeitsplätzen als auch aus automatisierten oder zumindest teilautomatisierten Stationen zusammensetzen (Seliger und Neu 1996; Spath und Baumeister 2001).

Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen für die Planung solcher Montagesysteme, da eine alternierende Abfolge manueller und (teil-)automatisierter Vorgänge die Leistungsabstimmung solcher Montagesysteme erschwert. In der Praxis fehlt es jedoch sowohl an einem Konzept als auch an einem Verfahren, den Mitarbeitereinsatz in hybriden Montagelinien zu planen und zu bewerten, da es hierbei im Vergleich zu traditionellen, technologisch orientierten Verfahren gilt, den

Mitarbeitereinsatz detailliert zu betrachten. So gilt es Konzepte wie teilautonome Arbeitsgruppen, den Einsatz von Springern und Mehrmaschinenbedienung geeignet zu berücksichtigen, wobei unter anderem auch Laufwege zwischen Arbeitsstationen eine Rolle spielen können. Dazu ist es notwendig, diese formale Lücke in der Planung von Montagesystemen mit Hilfe eines so genannten Personaleinsatzgraphen zu schließen. Dieses Konzept ist anschließend in ein Softwareverfahren zu integrieren, welches sich für die Bewertung einer Planungslösung die Simulation zu Nutze machen kann.

2 Die Lücke in der Planung von Montagesysteme

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Darstellung einer Montageablaufstruktur ist der Vorranggraph, der bereits 1964 von Prenting und Battaglin vorgestellt wurde. In diesem Graphen werden die einzelnen Montagevorgänge als Knoten eines Netzplans logisch und zeitlich verknüpft dargestellt. In dieser Darstellungsform können Kapazitäten jedoch nur als mit den Knoten verknüpfte Zusatzattribute dargestellt werden.

Dittmayer führte 1981 ein Tagesmenge-Stückzeit-Diagramm ein, das er als Kapazitätsfeld bezeichnete und der Kapazitätsteilung in arbeitsteiligen Montagesystemen dient. Dazu wird auf der Abszisse die Stückzeit einer Montageeinheit und auf der Ordinate die zu fertigende Tagesmenge aufgetragen (Dittmayer 1981; Warnecke und Dittmayer 1981). Da der Kapazitätsbedarf einer Montageaufgabe in der Regel größer als das Kapazitätsangebot eines einzelnen Montagearbeitsplatzes ist, gilt es, den Kapazitätsbedarf so in einzelne Kapazitätsbedarfsteile aufzuteilen, dass jeder dieser Teile durch das Kapazitätsangebot eines Arbeitsplatzes gedeckt werden kann. Durch horizontales Teilen eines Kapazitätsbedarfs im Kapazitätsfeld wird dabei eine Mengenteilung, durch vertikales Teilen eine Artteilung durchgeführt.

Um die Konzeption von Model-Mix-Montagesystemen zu unterstützen, entwickelte Braun (1995) den so genannten Komplexgraphen. In diesem werden die Vorranggraphen der in einem Montagesystem zu fertigenden Varianten gebündelt, sodass sich eine Gesamtdarstellung aller in einem Montagesystem durchzuführenden Vorgänge ergibt.

Auf Basis des Kapazitätsfeldes entwickelte Braun (1995) weitergehend den Kapazitätsgraphen. Dieser wird nach bestimmten Regeln in der Weise aus einem Kapazitätsfeld gebildet, dass zu jedem Kapazitätsfeld eine äquivalente Darstellung im Netzgraph ergibt. Dabei werden die Flächen des Kapazitätsfeldes als Knoten des Graphen aufgefasst; Kanten werden immer dann eingefügt, wenn sich die jeweiligen Flächen im Kapazitätsfeld entlang ihrer senkrechten Trennlinien berühren. Im Gegensatz zum Kapazitätsfeld eignet sich der Kapazitätsgraph auch zur Leistungsabstimmung von Model-Mix-Montagesystemen und kann damit aufbauend auf dem Komplexgraphen genutzt werden.

Bei der Planung hybrider Montagesysteme, in denen manuelle, mechanisierte und automatisierte Montagestationen eingesetzt werden, ergeben sich weitere Anforderungen an die Kapazitätsteilung, da der Kapazitätsbedarf der Vorgänge bezüglich Mitarbeiter, Betriebsmittel und Arbeitsgegenstand unterschiedlich sein kann. Dennoch berücksichtigen herkömmliche Konzepte für die Planung hybrider

Montagesysteme oft nur die Sicht einer einzelnen Ressource (Müller und Schneck 1992).

Bereits Dittmayer (1981) unterscheidet zwischen dem Kapazitätsangebot von Mitarbeitern und dem der von ihnen benutzten Arbeitsplätze. Zur Darstellung überlagert er dazu zwei Kapazitätsfelder, die das Angebot für Mitarbeiter und Arbeitsplatz zeigen. Müller (2002) geht noch einen Schritt weiter und entwickelt ein mehrstufiges Vorranggraphenkonzept, bei dem Montagevorgänge differenziert aus der Sicht von Mitarbeiter, Betriebsmittel und Arbeitsgegenstand betrachtet werden können. Dabei werden deren einzelne Kapazitätsbedarfe ausgewiesen und gegenübergestellt. Außerdem nimmt er eine Charakterisierung der Vorgänge in betriebmittel-, mitarbeiter- und arbeitsgegenstandsorientierte Vorgänge vor und orientiert sich dabei an der Sicht, die den größten Beitrag zum Kapazitätsbedarf eines Vorgangs leistet. Weiterhin wurde von Müller (2002) ein Modell der Personalstruktur für Teilmontagesysteme entworfen, in der Gruppen von Mitarbeitern mehreren Arbeitsplätzen des Systems zugeordnet werden, um so Auslastungsunterschiede auszugleichen.

Allerdings ist zu konstatieren, dass auch zum heutigen Zeitpunkt die Kapazitätsteilung von hybriden Montagesystemen mit Blick auf die Leistungsabstimmung von sowohl Betriebsmitteln als auch Mitarbeitern noch nicht zufriedenstellend gelöst ist. Eine geeignete Darstellungs- und Planungsmethode sollte dabei auf die Besonderheiten des Personaleinsatzes in Model-Mix-Montagesystemen eingehen, so z. B. die Verwendung teilautomatisierter Betriebsmittel und die daraus resultierende Mehrmaschinenbedienung, teilautonome Arbeitsgruppen oder auch den Einsatz von Springern. Diese Lücke in der Montageplanung kann durch die Konzeption eines so genannten Personaleinsatzgraphen gelöst werden.

3 Der Personaleinsatzgraph

Die Grundlage des Personaleinsatzgraphen bilden ein durch Kapazitätsteilung ermittelter Kapazitätsgraph und die dadurch vorgenommene Zuteilung der Montagevorgänge des Vorranggraphen zu Montagestationen. Ein Knoten des Kapazitätsgraphen wird dabei als ein Montagearbeitsplatz aufgefasst. Parallele Wege im Graphen stellen parallele Montagearbeitsplätze dar, die jeweils einer Arbeitsstation angehören. Die einzelnen Vorgänge des Vorranggraphen werden dann in den Arbeitsplatzknoten, denen sie zugeordnet sind, aufgetragen und nach benötigten Kapazitäten kategorisiert. Dabei wird zwischen rein betriebsmittelorientierten, rein mitarbeiterorientierten und gemischten Vorgängen unterschieden, für die ggf. beide Ressourcen während der gesamten Durchführungszeit des Vorgangs zur Verfügung stehen müssen. Ist ein Vorgang nicht kategorisierbar, da er zu unterschiedlichen Anteilen und Zeitpunkten die Kapazitäten des Betriebsmittels oder des Mitarbeiters benötigt, so muss er so oft in Teilvorgänge zergliedert werden, bis eine eindeutige Kategorisierung möglich ist.

Ähnlich wie bei Müller (2002) kann für die Zuordnung von Mitarbeitern zu Montagearbeitsplätzen ein Arbeitsgruppenkonzept vorgesehen werden. Dabei wird angenommen, dass mehrere Arbeitsplätze des Systems einer Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitarbeitern gleicher Qualifikation, zugeordnet werden, die dann teilautonom die Montagevorgänge dort verrichten. Die Mitglieder einer

Arbeitsgruppe werden im Personaleinsatzgraphen nicht individuell, sondern nur zahlenmäßig erfasst.

Bei Mehrmaschinenbedienung ist insbesondere bei nur kurzer Bedienzeit davon auszugehen, dass die Zeit, die ein Mitarbeiter zum Zurücklegen der Distanz zwischen den einzelnen Betriebsmitteln benötigt, einen nicht unerheblichen Anteil seines Kapazitätsangebots beansprucht. Aus diesem Grund sollten diese Zeiten bei der Planung des Montagesystems mit erfasst werden. Um die Darstellung des Personaleinsatzgraphen nicht unnötig zu verkomplizieren, werden diese Daten getrennt in einer Wegezeitenmatrix aufgetragen. In dieser Matrix bilden die Montagestationen die Zeilen und Spalten. Ein einzelner Wert der Matrix repräsentiert dann die Wegezeit, die für die Bewegung eines Mitarbeiters von der durch die Zeile zu der durch die Spalte angegebenen Montagestation benötigt wird. Falls einem Mitarbeiter mehrere Montagestationen oder teilautomatisierte Betriebsmittel zugewiesen werden sollen, sollte der Personaleinsatzgraph darüber hinaus die Möglichkeit bieten, die von diesem Mitarbeiter zurückzulegenden Wege zu erfassen. Dies geschieht durch die Einführung einer neuen Art von gerichteter Kante im Graphen, der Wegekante, die Start- und Endpunkt der Bewegung festlegt. Abbildung 1 zeigt einen solchen Personaleinsatzgraphen am Beispiel eines hybriden Montagesystems.

Nachfolgend soll beschrieben werden, wie einige spezielle Arten des Personaleinsatzes im vorliegenden Konzept für den Personaleinsatzgraphen dargestellt werden können.

Mehrmaschinenbedienung durch einen oder auch mehrere Mitarbeiter kann dadurch kenntlich gemacht werden, dass zuerst die einzelnen Betriebsmittel in einer Arbeitsgruppe gruppiert werden. Dieser Gruppe werden dann die Bediener als Gruppenmitglieder zugewiesen. Laufwege zwischen den einzelnen Betriebsmitteln können mit Hilfe von Wegekanten und Wegezeitenmatrix erfolgen. Ein Beispiel für Mehrmaschinenbedienung durch einen einzelnen Mitarbeiter ist die Arbeitsgruppe 1 in Abbildung 1.

Teilautonome Arbeitsgruppen können mit dem bereits beschriebenen Arbeitsgruppenkonzept des Personaleinsatzgraphen dargestellt werden. Auf die Bewegungsrichtungen innerhalb der einer Arbeitsgruppe zugewiesenen Montagestationen wird dabei verzichtet, um zu kennzeichnen, dass die Entscheidung über die Bearbeitungsreihenfolge der teilautonomen Arbeitsgruppe obliegt, z. B. bei Arbeitsgruppe 2 in Abbildung 1.

Einer oder mehrere *Springer* werden dadurch dargestellt, dass sie einer gesonderten Springer-Arbeitsgruppe zugewiesen werden, denen keine festen Arbeitsplätze zugewiesen sind. Stattdessen werden Wegekanten zwischen dieser Arbeitsgruppe und den Arbeitsplätzen, an denen sie die Mitarbeiter bei der Aufgabenverrichtung unterstützen sollen, aufgezeichnet. Ein Beispiel für die Darstellung eines Springers ist Arbeitsgruppe 3 in Abbildung 1.

4 Die Bewertung von Personaleinsatzgraphen

Zur Bewertung von Personaleinsatzgraphen und insbesondere der Auswirkungen verschiedener Alternativen des Personaleinsatzes können einerseits statische, graphentheoretische Kennzahlen, andererseits aber auch dynamische Kennzahlen

aus einer Simulation herangezogen werden. Nachfolgend werden einige Kennzahlen exemplarisch aufgezeigt. Zur Bewertung der dynamischen Auswirkung verschiedener Personaleinsatzgraphen können personalorientierte Simulationsverfahren herangezogen werden. Im Folgenden wird hierfür das am *ifab* entwickelte Simulationsverfahren *OSim* (Jonsson 2000) verwendet, das für die Abbildung und Simulation von Personaleinsatzgraphen entsprechend erweitert wurde, was zunächst die differenzierte Modellierung von manuellen Arbeitsplätzen sowie von teilautomatisierten und vollautomatisierten Arbeitsstationen und die Modellierung von Arbeitsgruppen umfasste. Weiterhin können Mitarbeiter zu Gruppen zusammengefasst werden, die sich dann einem Teil der Arbeitsplätze und Arbeitsstationen zuordnen lassen. Die Modellierung der Wegekanten und die Eingabe einer Wegezeitenmatrix ermöglichen die Modellierung von Personalbewegungen um geplante, vom Mitarbeiter zurückzulegende Wege bei der Mehrmaschinenbedienung.

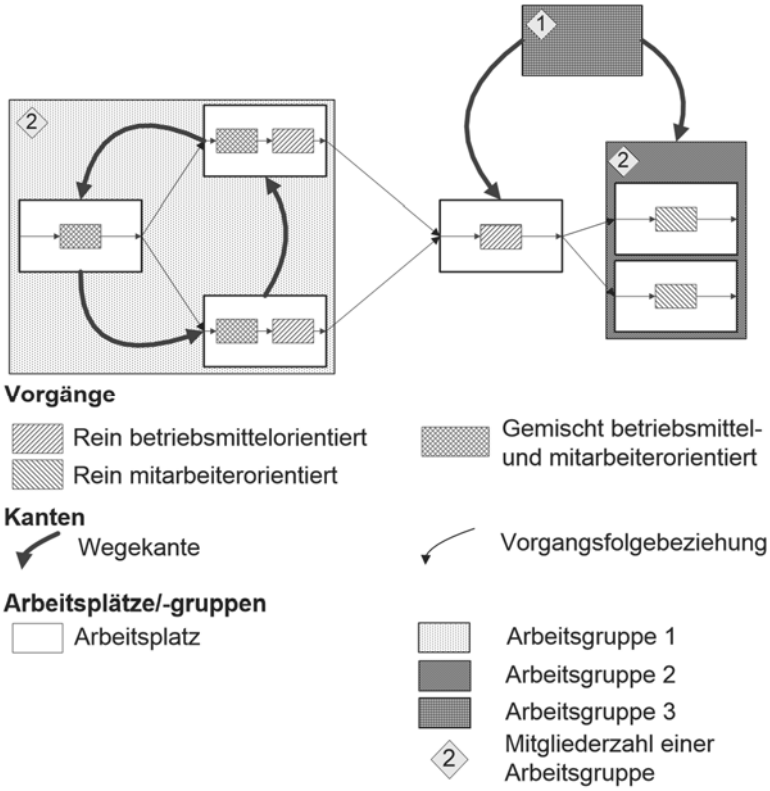


Abbildung 1: *Konzept eines Personaleinsatzgraphen am Beispiel einer hybriden Montagelinie (vgl. Zülch et al. 2012, S. 160)*

Das Simulationsverfahren *OSim* bietet die Möglichkeit zur Protokollierung des Simulationsablaufs und kann aus diesen Protokollen eine große Auswahl von Kennzahlen zur dynamischen Bewertung von Personaleinsatzgraphen berechnen. Im

Rahmen der Erweiterung des Simulationsverfahrens wurden einige Kennzahlen für das verwendete Arbeitsgruppenkonzept modifiziert.

Die Kennzahl „mittlerer Kapazitätsbestand“ wurde so angepasst, dass die „mehrfache“ Verfügbarkeit einer Arbeitsgruppe im Gegensatz zu einer einzelnen Ressource berücksichtigt werden kann. Konnte der Kapazitätsbestand vorher nur Werte zwischen 0 % und 100 % annehmen, so sind bei Arbeitsgruppen mit mehreren Mitarbeitern nun auch Werte über 100 % möglich. Dazu wird während der Simulation die jeweils aktuelle Anzahl von Gruppenmitgliedern protokolliert und zur Auswertung der zeitlich gewichtete Durchschnitt gebildet.

Zur dynamischen Bewertung mit Hilfe der Simulation wurde in das Verfahren *OSim* ein optimierender Backtracking-Algorithmus implementiert. der zunächst mehrere mögliche Personaleinsatzgraphen erzeugt, auf Durchführbarkeit überprüft und unter den geeigneten Alternativen diejenige auswählt, die bezüglich einer konfigurierbaren additiven oder lexikographischen Präferenzfunktion am besten geeignet ist (vgl. Zülch et al. 2012).

5 Das Anwendungsbeispiel

Da zur Erprobung des Verfahrens keine Praxisdaten oder Benchmarks zum Ergebnisvergleich vorlagen, wurde eine Montagelinie in der Weise modelliert, dass sinnvoll erscheinende Gestaltungsmöglichkeiten sowie das Optimum in Bezug auf eine multikriterielle Präferenzfunktion auch ohne Berechnung nachvollzogen werden können. Mittels eines Durchlaufs des Backtracking-Algorithmus kann dann verifiziert werden, ob dieses Optimum gefunden wurde.

5.1 Ausgangsmodell

Als Beispiel dient eine einfache Montagelinie mit den in Abbildung 2 dargestellten Montagevorgängen und Durchführungszeiten. Dabei seien die Montagevorgänge 2 und 7 automatisierbar.

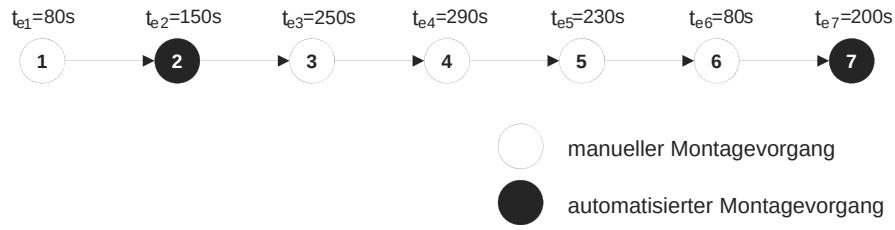


Abbildung 2: *Vorranggraph des Anwendungsbeispiels (i.A.a. REFA 1991; Müller 2002)*

Um im Einschichtbetrieb (8 h) eine Stückzahl von 96 erreichen zu können, wurde die Taktzeit auf *300 s* festgelegt. Die darauf folgende Kapazitätsteilung und Leistungsabstimmung ergab eine Verteilung der Montagevorgänge auf fünf Arbeitsstationen, wobei die Vorgänge 1 und 2 auf Station S1 und die Vorgänge 6 und 7 auf Station S5 zusammengelegt wurden (Abb. 3).

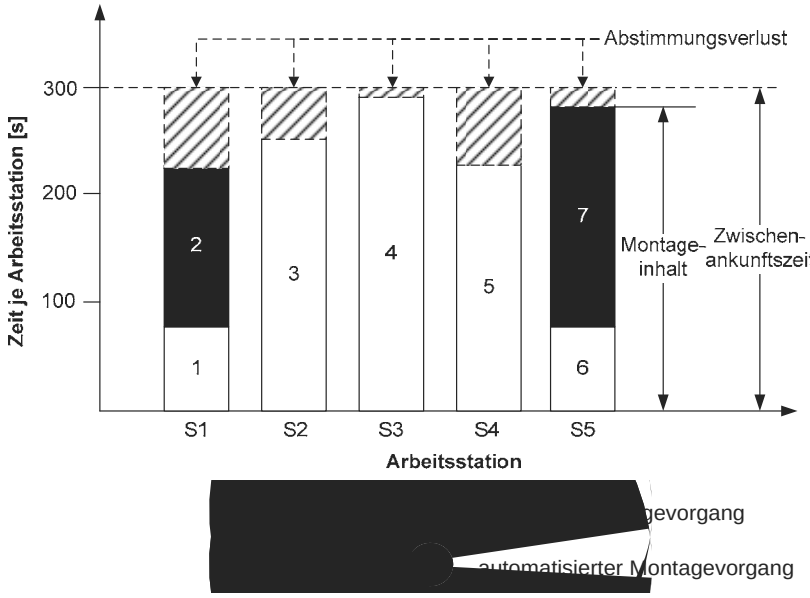


Abbildung 3: *Kapazitätsteilung des Anwendungsbeispiels (Darstellung iA.a. Bullinger 1986)*

Dabei sind die Mitarbeiter auf den Stationen S1 und S5 aufgrund des hohen Automatisierungsgrades nur zu jeweils ca. 26,7 % ausgelastet. Außerdem ist augenscheinlich, dass – bei entsprechend kurzer Wegezeit zwischen beiden Stationen – ein Mitarbeiter beide Arbeitsplätze bedienen könnte. Daher wurde als Anordnung der Arbeitsstationen eine U-Form (Abb. 4) gewählt. Die Wegezeiten zwischen den einzelnen Arbeitsstationen sind in Tabelle 1 als Wegezeitenmatrix angegeben:

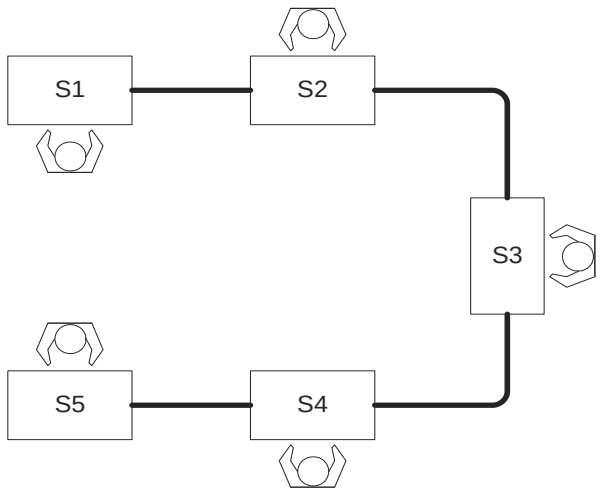


Abbildung 4: *Anordnung der Arbeitsstationen des Anwendungsbeispiels*

Tabelle 1: *Wegezeitmatrix des Anwendungsbeispiels (Zeiten in Sekunden)*

	S1	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**
S1	0	200	310	200	50
S2	200	0	105	100	180
S3	310	105	0	130	280
S4	200	100	130	0	180
S5	50	180	280	180	0

5.2 Simulations- und Optimierungsmodell

Zur Verifizierung der Annahme, dass der Kapazitätsbedarf der Stationen S1 und S5 durch das Kapazitätsangebot eines einzelnen Mitarbeiters abgedeckt werden könnte, wurde das Modell der Montagelinie als Simulationsmodell mittels *OSim* erstellt. Jedem der manuellen Montagevorgänge wurde eine Arbeitsgruppe zugeordnet.

Im Ausgangsmodell besitzt keine der Stationen parallele Arbeitsplätze. Zur Optimierung wurde jeder der Stationen die Größe seines vorgelagerten Puffers sowie eine plausible Startbelegung der Puffer im Sinne der maximal und zu Simulationsbeginn in ihnen enthaltenen Anzahl von Arbeitsgegenständen zugewiesen. Damit ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Parameter:

Tabelle 2: *Parameter der Arbeitsstationen des Anwendungsbeispiels*

Arbeitsstation	**par. Arbeitsplätze**	**Puffergröße**	**Startbelegung**
Station 1	1	4	2
Station 2	1	1	1
Station 3	1	1	1
Station 4	1	1	1
Station 5	1	4	1

5.3 Optimierung

Wie bereits aus Abbildung 4 ersichtlich, wurde als Eingabewert für den Backtracking-Algorithmus von vier Mitarbeitern ausgegangen. Als Zykluslänge wurde die Taktzeit von 300 s verwendet. Als Zielkriterium des Algorithmus wurde die Minimierung der Durchlaufzeit angegeben. Zur Bewertung mittels Simulation wurde, um Einschwingeffekte geeignet berücksichtigen zu können, eine Simulationsdauer von einem Tag gewählt.

Wie erwartet findet der Backtracking-Algorithmus mit den vorgegebenen Eingabeparametern genau einen zulässigen Personaleinsatzgraphen. Zu Beginn wird jeder der Arbeitsgruppen 1, 2, 3 und 4 ein Mitarbeiter zugewiesen, Arbeitsgruppe 5 ist anfangs unbesetzt. Mit Hilfe des Verfahrens wird ermittelt, dass die Montagelinie

mit vier Mitarbeitern betrieben werden kann, wenn sich in einem 300 s dauernden Zyklus

- ein Mitarbeiter nach einmaliger Durchführung von Vorgang 1 von Arbeitsgruppe 1 zu Arbeitsgruppe 5 bewegt und
- ein Mitarbeiter nach einmaliger Durchführung von Vorgang 6 von Arbeitsgruppe 5 zu Arbeitsgruppe 1 bewegt.

Dies entspricht einem permanenten Wechsel eines Mitarbeiters zwischen den Stationen 1 und 5. Abbildung 5 zeigt den daraus entstehenden Personaleinsatzgraphen des Anwendungsbeispiels.

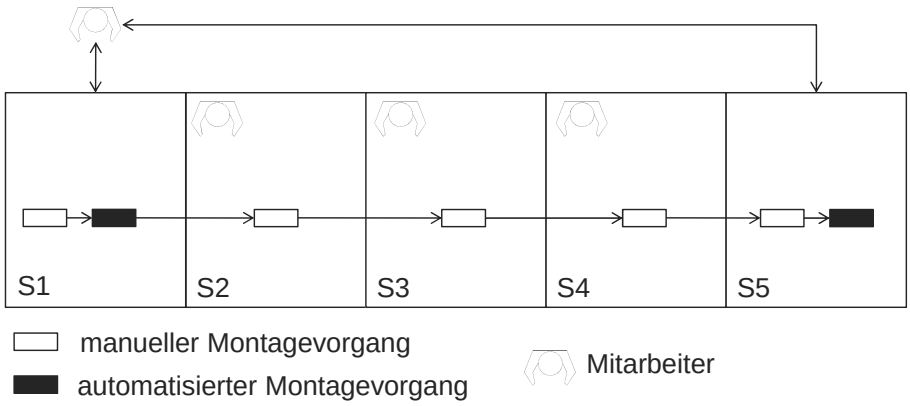


Abbildung 5: *Personaleinsatzgraph des Anwendungsbeispiels*

6 Fazit

Dieser Beitrag stellte ein erstes Konzept für einen Personaleinsatzgraphen vor. Mittels dieser Darstellungsweise ist es möglich, teilautonome Arbeitsgruppen, Mehrmaschinenbedienung sowie Springer in Model-Mix-Montagesystemen abzubilden. Dies wurde hier am Beispiel einer U-förmigen Montagelinie demonstriert. Mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus auf Basis des Backtracking-Verfahrens wurde gezeigt, wie sich optimale Personaleinsatzgraphen zu einer bestehenden Montagelinie und deren Kapazitätsgraphen bestimmen lassen.

Damit wurde veranschaulicht, dass eine getrennte Betrachtung der Kapazitäten von Betriebsmitteln und Mitarbeitern prinzipiell möglich ist und zu positiven Ergebnissen führen kann. Aufgrund des Mangels an realen Daten aus der Praxis konnten das Ausmaß der Effekte oder die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens allerdings noch nicht geeignet bewertet werden.

In weitergehenden Forschungsarbeiten sollte die Anwendbarkeit dieser Darstellungsweise in der Planung von Montagesystemen untersucht und falls nötig noch erweitert werden. Weiterhin erscheinen die Verifizierung und die Validierung des entwickelten Bewertungsverfahrens und des Backtracking-Algorithmus anhand praktischer Beispiele notwendig.

Literatur

Braun, W. J.: Beitrag zur Festlegung der Arbeitsteilung in manuellen Montagesystemen. Karlsruhe: Univ., Diss., 1995. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 9)

Bullinger, H.-J.: Systematische Montageplanung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1986.

Dittmayer, S.: Arbeits- und Kapazitätsteilung in der Montage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. (IPA Forschung und Praxis, Band 55)

Jonsson, U.: Ein integriertes Objektmodell zur durchlaufplanorientierten Simulation von Produktionssystemen. Aachen: Shaker, 2000. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 21)

Lewis, T. G.: Network Science: Theory and Applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.

Lotter, B.: Sicherung der Montage am Standort Deutschland. In: HYMOS Hybride Montagesysteme, Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt. Dortmund: Verlag der Gesellschaft für Arbeitsschutz- und Humanisierungsforschung, 1999, S. 11–18.

Müller, R.: Planung hybrider Montagesysteme auf Basis mehrschichtiger Vorranggraphen. Aachen: Shaker, 2002. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 27)

Müller, R., Schneck, M.: Dynamische Bewertung von Planungen für hybride Montagesysteme. In: Heel, J. and Krüger, J. (Hrsg.) Personalorientierte Simulation - Praxis und Entwicklungspotential. Aachen: Shaker 1999, S. 73-88. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 19)

Prenting, T.; Battaglin, R. M.: The Precedence Diagram: A Tool for Analysis in Assembly Line Balancing. In: Journal of Industrial Engineering, New York, 15 (1964) 4, S. 209–213.

REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation: Arbeitsgestaltung in der Produktion. München: Carl Hanser Verlag, 1. Aufl. 1991. (Methodenlehre der Betriebsorganisation)

Seliger, G.; Neu, S.: Montagesysteme. In: Produktion und Management „Betriebshütte“, Teil 2. Hrsg.: Eversheim, W; Schuh, G. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996, S. 10–35.

Spath, D.; Baumeister, M.: Hybride Montagesysteme mit absatzsynchroner Materialbereitstellung. In: Industrie Management, Berlin, 16 (2002) 2, S. 35–38.

Warnecke, H.-J., Dittmayer, S.: Planning of Division of Labor in the Assembly Environment. CIRP Annals - Manufacturing Technology 30 (1981) 1, S. 395-400.

Zülch, G.; Leupold, M.; Gamber, T.: The Staff Assignment Graph – Planning, Evaluating and Improving Personnel Deployment in Assembly Systems. In: Advances in Production Management Systems (Revised Selected Papers). Hrsg.: Frick, J.; Laugen, B.. Heidelberg u.a.: Springer 2012, S. 157-164.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Einsatz der Simulation zur Evaluation von Personaleinsatzplanungsergebnissen

Use of simulation to evaluate the results of staff scheduling

Christian Müller, Emre Koç,
Universität Duisburg-Essen, Duisburg (Germany),
christian.mueller.9@stud.uni-due.de, emre.koc@uni-due.de

Mohammed Mouelhi,
SDZ GmbH, Dortmund (Germany),
m.mouelhi@sdz.de

Çağdaş Özgür, Bernd Noche,
Universität Duisburg-Essen, Duisburg (Germany),
cagdas.oezguer@uni-due.de, bernd.noche@uni-due.de

Abstract: The After-Sales business is one of the most rapid growing business areas today. The character of the business requires a high service on the one hand and an efficient execution of the inherit processes on the other hand. This paper proposes new software on staff scheduling in the After-Sales business due to its high optimization potential. Cloud based staff scheduling simplifies the adaption of the software by different users and enables the outsourcing of hardware and software. The large amounts of data, which can lead to lose track of optimization plan at hand in manual planning, are made transparent to users in automatic planning. Users can also alter the automatically generated plans and re-optimize the altered plans. Heuristics are used instead of exact solution methods. The simulation model validates the results of the optimization model, the generated staff schedules fed into simulation which in turn shows the utilization of employees, workplaces and tools.

1 Motivation

In der Logistik existieren momentan fünf große Veränderungstreiber: Kundenorientierung, neue Arbeitsteiligkeit, Ressourcenverfügbarkeit, Globalisierung sowie der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie. Diese Veränderungen betreffen die gesamte Logistikkette von der Beschaffung bis zur Distribution. Die Entwicklung zwingt die Unternehmen zu weitreichenden Entscheidungen, die Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung notwendig machen (Kuhn et al. 2008, S.20). Außerdem stellen sich weitere Anforderungen an die Logistik. So müssen kundenindividuelle Produkte in möglichst kurzen Perioden

produziert und geliefert werden. Die daraus resultierenden kürzeren Bestell- und Produktionszyklen führen zu einer steigenden Dynamik bei der Planung und Durchführung der Logistik. Eine andere Herausforderung sind wachsende Unsicherheitsfaktoren, welche die Unternehmen zu kurzfristigen Reaktionen zwingen. Ihnen soll mit Transparenz und Reaktionsfähigkeit entgegengetreten werden (Kuhn et al. 2007, S. 14f). Ein Großteil der Kunden fordert eine hohe Qualität der Kundenservices, besonders nach dem Kauf hochwertiger Produkte. Somit steigen auch die Ansprüche an den Bereich des After Sales.

Planungen von Fertigungssystemen werden häufig ohne Berücksichtigung des Personals durchgeführt. Das Personal wird meist erst im Anschluss durch eine überschlägige Berechnung des Personalbedarfs geplant. Dabei werden oft die Anforderungen an die Arbeitnehmer außer Acht gelassen. Somit ist ein solches Vorgehen eher ungeeignet, um notwendige Personalstrukturen zu bestimmen (Zülch et al. 1998, S. 91). Es haben sich in letzter Zeit Ansätze durchgesetzt, die die Simulation als Hilfsmittel nutzen (Zülch et al. 1994, S. 269ff.). Die Kombination einer heuristischen Personaleinsatzplanung mit der Simulation wurde in verschiedenen Lösungskonzepten erarbeitet. Da die Fragestellung noch aktuell und nicht ausreichend gelöst ist, bietet das Thema Personaleinsatzplanung großes Potenzial für die Forschung. Zülch (2010, S. 1-19) stellt in seinem Beitrag den aktuellen Stand und Entwicklungstendenzen der personalorientierten Simulation dar. Die Simulation erlaubt hierbei eine dynamische Betrachtung eines realen Fertigungs- oder Montageprozesses mit Personal, wobei z.B. Überschneidungen oder Mehrfachanforderungen berücksichtigt werden. Sie kann somit reales Systemverhalten vorhersagen. Damit ist eine Hinwendung zu einer ganzheitlichen Betrachtung des Produktionssystems mit Berücksichtigung personeller Aspekte zu beobachten. Der Mensch ist hierbei ein zentraler Aspekt der Simulation mit der Berücksichtigung von Anwesenheit und Qualifikation (Zülch et al. 1998, S. 102).

Im Mittelpunkt dieses Beitrags steht die Einsatzplanung von Mitarbeitern im Bereich After Sales Services. Hierfür wurden ein Konzept und ein Werkzeug für die Personaleinsatzplanung entwickelt.

2 Ausgangssituation

Laut einer Gemeinschaftsstudie von ATOSS, FAZ und SRH FH Heidelberg ist der Einsatz von Personalplanungssoftware bei den umsatzstärksten deutschen Unternehmen aus Dienstleistung und Industrie noch nicht weit verbreitet. So setzen 86,4 % der Befragten noch auf Erfahrungswerte. 70,9 % der Teilnehmer der Studie setzten für die Personalplanung Methoden der Tabellenkalkulation ein. Der Einsatz für Spezialsoftware bei Personaleinsatzplanung liegt bei 41,1 % (ATOSS et al. 2006, Abbildung 24).

Eine besondere Problemstellung hierbei ist die häufig nicht vorhandene Bewertung erstellter Ergebnisse. So werden Lösungen, die von Anwendern oder mittels einer Software erstellt werden, hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit nicht bewertet. Eine weitere Herausforderung bei der Personalplanung ist eine möglichst intuitive Bedienung des Planungswerkzeugs, so dass die Interaktion des Menschen mit dem Tool auf die notwendigen und gewünschten Aktionen reduziert werden kann. Zusätzlich sollte das Planungswerkzeug in der Lage sein, nicht nur die Lösung des

Problems bereitzustellen, sondern diese Lösung auch effizient und möglichst optimal zu generieren.

Weitere Herausforderungen zum Einsatz von Planungssystemen sind die aufwändige Individualisierung und eine lange Implementierungszeit. Dies führt zur Forderung, dass ein Planungswerkzeug die Problemstellungen einzelner Unternehmen ohne großen Aufwand der individuellen Anpassung ermöglichen sowie eine Implementierung deutlich vereinfachen soll.

In dem Bereich der Integration der Simulation in den Personalplanungsprozess zeigt Rose in einigen Papers (Majohr et al. 2008; Noack et al. 2008) die Einsatzmöglichkeit der Simulation zur Bewertung. Ein ähnliches Konzept beschreibt Huang u.a., wobei die Simulation zur Überprüfung von Zuordnungsregeln genutzt wird (Huang et al. 2009). Heitz (1994, S. 127ff.) zeigt ebenfalls die Nutzung von Simulation in einem Zwei-Phasen-Konzept. Dabei werden in der ersten Phase mehrere Ausgangslösungen erzeugt. Diese Ausgangslösungen werden in der zweiten Phase verbessert. Die Personalstruktur wird hierbei mittels Simulation überprüft (Heitz 1994, S. 127ff.). Die Verwendung der Kombination von Simulation und Optimierung stellt April u.a. an einem Bespiel dar (April et al. 2003). Auch Zülch et al. (1998, S. 91-126) zeigt in einem Beitrag zwei praxisnahe Beispiele. So soll bei einem Praxiseinsatz mit Hilfe der Simulation das Potential einer flexiblen Personaleinsatzplanung geklärt werden. Im anderen Fall sollten innerhalb eines Umstrukturierungsprojektes eines mittelständischen Herstellers von Blechhalbzeugen geeignete Formen des Personaleinsatzes entwickelt und mit Hilfe der Simulation bewertet werden. Des Weiteren zeigen Zülch und Waldherr (2011, S. 171-183) anhand der Junghans Microtec GmbH die Nutzung der personalorientierten Simulation. Sie sichern damit die Verlagerung der Teilefertigung mit Hilfe der Simulation ab. Dies basiert auf einem Zwei-Phasen-Konzept. Dabei wird in der ersten Phase eine geeignete Initiallösung gefunden und in der zweiten Phase iterativ verbessert. Diese Verbesserung geschieht durch die Verbindung von Simulation und einem Algorithmus. In der Praxis hat die Firma PSI Logistics ein Tool zur Personaleinsatzplanung bei einem DPD-Depot in Villingen-Schwenningen integriert, wobei auf die Simulationsmethoden im Konzept verzichtet wurde (o.V. 2012).

Der Aspekt der webbasierten Simulationslösungen wurde im Rahmen des Forschungsprojekts simKMU - Entwicklung unternehmensübergreifender, prozessintegrierter und webbasierter Simulationsdienstleistungen und Geschäftsmodelle für KMU von der Firma SDZ GmbH bereits betrachtet und als Dienstleistung entwickelt (www.simkmu.de). Die ersten Demonstratoren aus dem Forschungsprojekt Supply Chain Planning zeigen die Nutzenpotenziale für die entwickelten Cloud-Services, die auch schon von außenstehenden Unternehmen erkannt wurden.

Die erläuterte Problemstellung stellt einen Use-Case des Forschungsvorhabens „Supply Chain Planning“ dar (SCP (Supply Chain Planning) ist ein Verbundprojekt im Forschungsvorhaben „Effizienz Cluster LogistikRuhr“ (gefördert durch BMBF)). Die Hauptbestandteile des Lösungsansatzes dieses Projekts lassen sich in zwei Komponenten aufteilen: Personaleinsatzplanung durch eine Heuristik und Evaluierung der Ergebnisse durch den Einsatz von Simulation. In dem hier vorgestellten Konzept werden die Planungsservices über eine Cloud-Plattform durchgeführt. Der Anwender soll ohne Installation einer Software Zugang zu diesem

Planungsservice haben. Somit entfallen die Installation und die Notwendigkeit der CPU-Kapazitäten.

3 Lösungsansatz

Das Ziel des Vorhabens im Projekt „Supply Chain Planning“ war die Erstellung eines Prototyps für den Bereich ‚After Sales‘, der eine Planung von Ressourcen ermöglicht und damit die Komplexität der Personaleinsatzplanung reduziert. Die Innovation der angestrebten Entwicklung im Projekt „Supply Chain Planning“ ist eine dezentrale unternehmensübergreifende Logistiklösung auf Basis einer serviceorientierten Plattform.

Es wurde ein cloudbasierter Lösungsansatz für die Personaleinsatzplanung entwickelt. Dazu wurde eine Heuristik konzipiert, die am Lehrstuhl für Transportsysteme und -logistik der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurde. Die Personaleinsatzplanung ist ein Bestandteil der Personalplanung (Wöhe 2005, S.156ff). Sie wird definiert als „die Zuordnung der Mitarbeiter zu den verfügbaren […] Arbeitsplätzen“ (Olfert 2011, S. 261).Sie kann quantitativ, qualitativ, räumlich oder zeitlich sein. Die von der Universität Duisburg-Essen entwickelten heuristischen Verfahren sind ein Mix aus drei möglichen Komponenten. Der entwickelte Personaleinsatzplan zeigt an, wie viele Arbeitnehmer (quantitativ) zu welcher Arbeitszeit (zeitlich) in welchen Arbeitsbereichen (räumlich) arbeiten.

Dabei berücksichtigen die entwickelten Planungsalgorithmen vielfältige Faktoren (sowohl betriebsinterne als auch arbeitsrechtliche), die erst zu einer validen Einsatzplanung führen.

Die entwickelten Algorithmen wurden in dem cloudbasierten Planungstool zur Lösung der Personaleinsatzplanung eingesetzt. Die Verknüpfung der Lösungsverfahren mit einem Cloud-Service ermöglicht dem Nutzer eine einfachere und breitere Anwendung der Personaleinsatzplanung. Das Planungstool kann über eine Internetadresse erreicht werden. Der Anwender hat die Möglichkeit, die notwendigen Planungsdaten manuell einzugeben oder als komplette Datei hochzuladen. Die Bestimmung der Planungsparameter und die Darstellung der Ergebnisse finden ebenfalls in dieser Web-Plattform statt.

Zur Überprüfung der von der heuristischen Personaleinsatzplanung erzeugten Ergebnisse wird die Simulation eingesetzt, die laut VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2010) als „Durchführung von Experimenten an einem Modell“ definiert wird.

Der Einsatz von Simulation in den Bereichen der Logistik bietet ein hohes Potenzial (Rose et al. 2011, S.14). Die Nutzenaspekte einer Simulation sind laut VDI-Richtlinie 3633 (2010) Sicherheitsgewinn, kostengünstigere Lösungen, besseres Systemverständnis und günstigere Prozessführung. Diese Vorteile lassen sich auf die personalorientierten Simulationsmodelle übertragen. Die personalorientierte Simulation ist laut VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6 (2001) nützlich, da das Erreichen produktionswirtschaftlicher Ziele von dem Einsatz und Verhalten des Personals abhängig ist. Sie lassen aussagefähige Bewertungen von Planungsalternativen des Personaleinsatzes zu. Dabei ist ein besonderer Einsatzbereich der Simulationsmodelle mit Personal die Feststellung guter Personalstrukturen. Es kann der personelle Einsatzbedarf analysiert und mögliche Veränderungen der Arbeitsstrukturen sichtbar gemacht werden. Es gibt drei Methoden für die Bewertung der Simulation

vorhandener Modelle: Evolutionsmethode, Auswahlmethode und Sensitivitätsmethode. Bei der Evolutionsmethode wird ein vorhandenes Modell simuliert und die daraus resultierenden Ergebnisse bewertet, interpretiert und mögliche Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet (Zülch et al 1998, S. 103f.). Die durchgeführte Simulation in diesem Paper ist die Grundlage der Evolutionsmethode.

In diesem Beitrag werden Personaleinsatzplanung und Simulation als Bestandteile eines Lösungsprozesses genutzt, der hierarchisch aufgebaut ist (Abb. 1). Dabei wird zuerst ein möglicher Personaleinsatzplan mit Hilfe einer Heuristik erstellt und im Folgenden durch eine Simulation evaluiert. Für die Simulation wurde das Tool DOSIMIS-3 von der Firma SDZ GmbH genutzt.

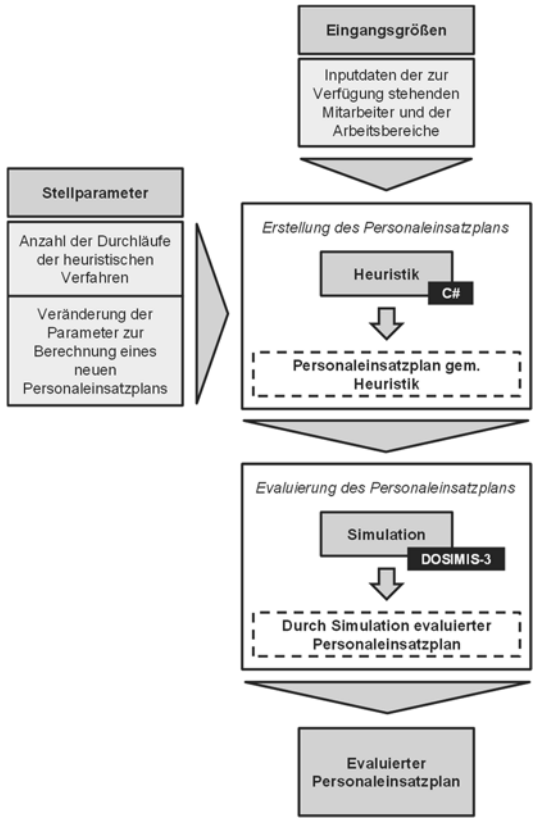


Abbildung 1: *Lösungsansatz zur Generierung eines als gut bewerteten Personaleinsatzplans (In Anlehnung an März et al. 2011)*

Die Struktur des Lösungsansatzes wird in Abbildung 2 dargestellt und besteht aus drei Ebenen. Die erste Ebene ist der Service zur Datenaufbereitung. Hier kann der Anwender entweder schon vorhandene Daten einlesen oder sie manuell vorgeben. Der zweite Teil ist das Planungs- und Optimierungsmodell. Hier werden aus den Inputdaten möglichst optimale Zuordnungen der Mitarbeiter mit Hilfe der Heuristik geschaffen. Das Personaleinsatzplanungs-Tool erstellt einen Personaleinsatzplan. Dessen Eignung und Wertigkeit wird mit Hilfe der Simulation in DOSIMIS-3

evaluiert. Der Nutzer sollte hierbei die Möglichkeit haben vorhandene Lösungen zu ändern und diese Szenarien mit Hilfe des Simulationsmodells nochmals überprüfen zu lassen. Ist der Anwender mit der Lösung einverstanden, werden die Ergebnisse aufbereitet und in der Cloud dargestellt. Überdies werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien angezeigt. Der Nutzen bei diesem Lösungsansatz besteht darin, dass der Kunde nur einen Zugang zu einer Cloud benötigt. Auf dieser Plattform kann der Anwender die notwendigen Daten eingeben oder eine Datei mit den Inputdaten importieren. Die Heuristik läuft ausgelagert auf einem Server und erzeugt die Ergebnisse.

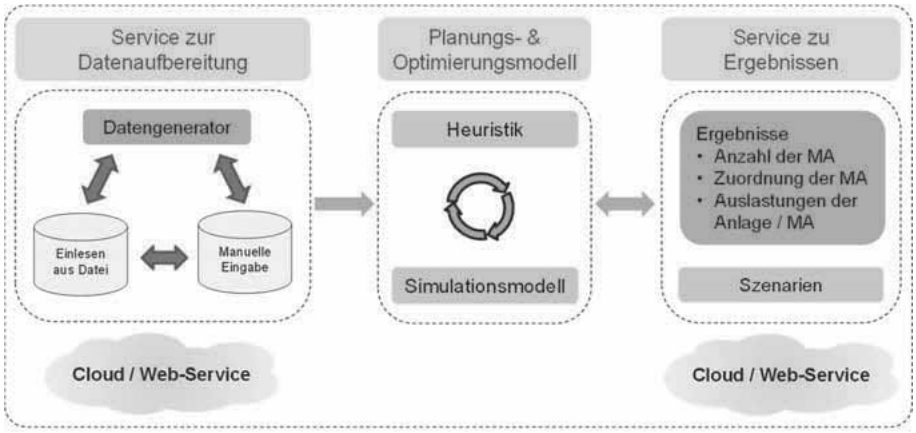


Abbildung 2: *Ablaufschritte des Prototyps*

Der Anwender kann das erstellte Personaleinsatz-Tool über die Internet-Adresse http://apps.sdz.de/scp erreichen. Auf der Startseite muss er sich mit seinem User-Namen und seinem Passwort anmelden. Ist er angemeldet wählt er zwischen der manuellen Eingabe aller notwendigen Parameter oder dem Hochladen einer Datei. Bei der manuellen Eingabe muss der Anwender alle notwendigen Parameter in die Dialogmaske eingeben. Wenn der Anwender eine Datei einlesen lässt, kann er nach dem erfolgten Datenimport in einer identischen Dialogmaske die vorhandenen und eingelesenen Parameter verändern. Danach wählt er genauso wie bei der manuellen Eingabe der Parameter eine Lösungsoption aus. Ist der Anwender mit den Ergebnissen der gewählten Heuristik zufrieden, kann er die Ergebnisse nochmals detailliert bewerten lassen. Dabei wird eine tagesweise Simulation gestartet, die mit einigen Informationen gespeist wird.

Als Lösungsmöglichkeiten kann der Anwender zwei Optionen wählen (Abb. 3). Die erste Option ist eine Heuristik, die die Mitarbeiter erst zu den Arbeitsbereichen zuordnet und dann den Perioden zuteilt. Dabei kann der Nutzer bei dieser Heuristik zwischen zwei Möglichkeiten wählen. Bei der ersten Möglichkeit kann er Arbeitskräfte zu den Perioden fixieren. Die zweite Möglichkeit lässt die erste Heuristik direkt laufen. Bei der ersten Option hat der Anwender die Möglichkeit die Lösung zu verändern. Er kann die Zuordnung der Mitarbeiter zu den Perioden und den Arbeitsbereichen nachträglich beeinflussen sowie einzelne Mitarbeiter nochmal ganz entfernen. Danach kann er die Ergebnisse nochmals berechnen lassen. Die

zweite Option arbeitet mit einer Heuristik, die die Mitarbeiter zu Arbeitsgruppen zusammenfasst und diese dann den Perioden zuordnet. Hierbei gibt es ebenfalls wieder zwei mögliche Anwendungen. Die erste Anwendung ermöglicht die Festlegung bestimmter Arbeitnehmer zu den Arbeitsgruppen, die andere Anwendung lässt direkt die zweite Heuristik laufen. Beide heuristische Verfahren sind zweigliedrig. Im ersten Teil werden die Mitarbeiter den einzelnen Arbeitsbereichen für jeden Tag zugeordnet. Dabei werden die Anwesenheitsinformationen sowie die Qualifikationen der Mitarbeiter für die verschiedenen Arbeitsbereiche berücksichtigt. Im nächsten Abschnitt ordnen die heuristischen Verfahren die Mitarbeiter direkt den Perioden (Arbeitszeiten) zu (erste Heuristik) oder die Mitarbeiter werden erst zu Arbeitsgruppen zusammengefasst, die den Perioden zugeordnet werden (zweite Heuristik). Dieser Abschnitt der heuristischen Verfahren ordnet die Mitarbeiter nacheinander dem Tag mit dem jeweils größten ermittelten Mitarbeiterbedarf zu, der vorher durch die Verfahren anhand der angegebenen Parameter ermittelt wurde. Während der erste Abschnitt beider Verfahren die Anwesenheitsinformationen sowie die Qualifikationen der einzelnen Mitarbeiter berücksichtigt, muss der zweite Teil der heuristischen Verfahren mehrere Restriktionen berücksichtigen. Insgesamt sind die acht. Eine Restriktion berücksichtigt die maximale Kapazität der Arbeitsbereiche, d.h. die maximale Anzahl an Mitarbeitern, die in einem Arbeitsbereich arbeiten können. Eine andere Nebenbedingung bezieht die prognostizierte Arbeitslast ein. Diese sollte möglichst genau gedeckt sein, so dass nicht zu viele Mitarbeiter eingesetzt werden. Fünf weitere Restriktionen beziehen sich auf die individuellen Parameter der Mitarbeiter: So darf die vertragliche Arbeitszeit eines Arbeitnehmers in einer Woche nicht überschritten werden. Des Weiteren sollte er anwesend sein, wenn er eingesetzt wird. Außerdem darf eine gesetzliche Mindestruhezeit von 12 Stunden nicht unterschritten werden und jede Arbeitskraft sollte maximal 8 Stunden pro Tag arbeiten. Bei Berücksichtigung aller genannten Restriktionen haben beide heuristischen Verfahren das Ziel, die prognostizierte Arbeitslast möglichst abzudecken und eine Unterdeckung zu vermeiden. Das Ergebnis jeder Heuristik wird in einem Ergebnistableau dargestellt. In diesem Tableau erkennt der Anwender sowohl die Einsatzzeit, Einsatzort (Arbeitsbereich) sowie die Arbeitsgruppe, indem der einzelne Mitarbeiter eingesetzt wurde. Weitere Informationen sind der Restbedarf pro Tag, der nicht bearbeitet wird und die vorhandene Restkapazität an freien Arbeitsstellen pro Arbeitsbereich und Periode. Außerdem wird die noch vorhandene Restarbeitszeit eines jeden Arbeitnehmers dargestellt.

Die heuristischen Verfahren, auf denen das Tool basiert, sind speziell für den Anwendungsfall der Personalentwicklung abgestimmt und wurden an der Universität Duisburg-Essen entwickelt. Alle Schritte der ersten beiden heuristischen Verfahren basieren auf einer Zufallszuordnung, die die notwendigen Parameter wie Qualifikation, Anwesenheit oder maximale Arbeitszeit in der Woche berücksichtigt. Diese Zufallszuordnung wird in einem zweiten Schritt durch ein weiteres Verfahren in ihrer Qualität verbessert. Das Ziel beider heuristischen Verfahren ist, den Einsatz der Mitarbeiter in den Arbeitsbereichen und in den jeweiligen Arbeitsperioden so zu gestalten, dass die Anzahl unbearbeiteter Produkte bzw. Dienstleistungen minimal ist. Für die Bewertung der Ergebnisse wurde ein Simulationsmodell des Planungsbetriebs erstellt und die verschiedenen Leistungskennzahlen zusammen mit den Anwendern geprüft.

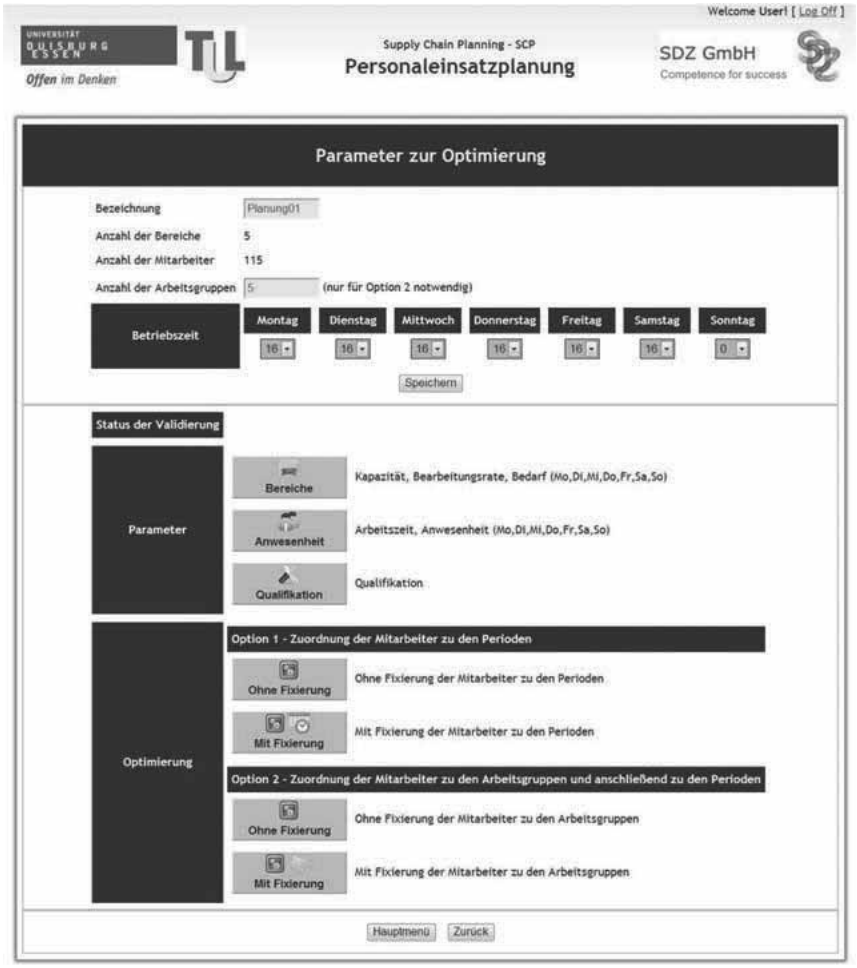


Abbildung 3: *Parametereingabe bei der Webanwendung*

Startet der Anwender die Simulation, muss er neben den bereits existierenden noch detaillierte Parameter angeben. Dies geschieht in einer weiteren Dialogmaske (Abb. 4), die auch die vorher schon eingegebenen sowie berechneten Parameter der Heuristik übernimmt. Der Simulationslauf zeigt mögliche Engpässe im Ablauf an und somit auch notwendige Nachjustierungen des Planungsergebnisses. Die Abbildung des (physischen) Prozesses als Simulationsmodell findet in DOSIMIS-3 statt. Dazu werden im Simulationsmodell alle Arbeitsstellen mit den zugeordneten Arbeitsplätzen abgebildet. Die Simulation übernimmt die Anzahl der Mitarbeiter pro Periode aus dem Personaleinsatzplan und aktiviert die geplante Anzahl an Arbeitsstellen im Simulationsmodell. Die Disposition der Mitarbeiter erfolgt mittels des Werkermoduls von DOSIMIS-3. Dieses übernimmt die Aufgabe, den Werkern Arbeitsplätze zuzuordnen. Dabei wird die unterschiedliche Qualifikation aller Werker berücksichtigt. Über Pausen- und Schichtmodelle wird die Verfügbarkeit eingeschränkt. Durch die Definition einer Wegematrix kann DOSIMIS-3 Wegezeiten ermitteln, die Werker während ihrer Tätigkeiten zurücklegen. Dabei kann es sich

ebenso um die Wege zwischen Sozialräumen und Arbeitsplätzen handeln wie um Wege zwischen unterschiedlichen Arbeitsplätzen (z.B. bei Springern, die an mehreren Arbeitsplätzen oder in unterschiedlichen Bereichen tätig sind). Das Werkermodul disponiert auch die Ausführung von Tätigkeiten der Mitarbeiter. Dazu können unterschiedliche Prioritäten der Ausführung vorgegeben werden. Der Wechsel von Mitarbeitern zwischen Arbeitsplätzen kann erzwungen bzw. vorgegeben werden. Auf diese Weise erfolgt eine Abbildung des Personaleinsatzes in DOSIMIS-3.

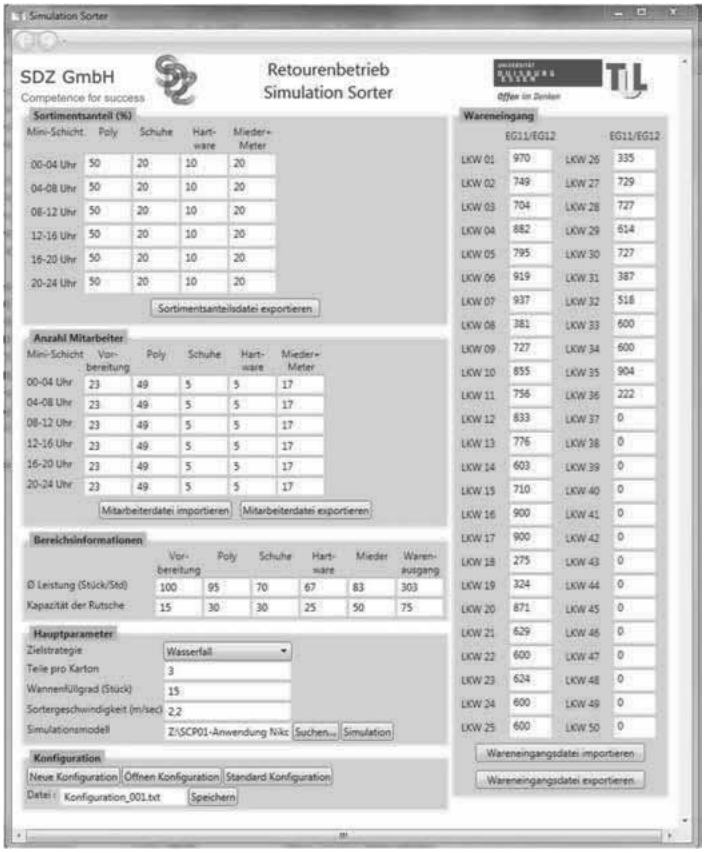


Abbildung 4: *Dialogmaske für das Simulationsmodell*

Neu an diesem Tool ist die Nutzung der Cloud. Der Anwender benötigt keine großen CPU-Kapazitäten. Das Personaleinsatzplanungs-Tool läuft dazu auf einem in die Cloud ausgelagerten Server. Der Nutzer muss nur seine Parameter in die Dialogmaske eingeben oder eine entsprechende Datei mit den notwendigen Daten besitzen, die er hochladen kann.

4 Anwendungsbeispiel

Das im Folgenden aufgezeigte Lösungskonzept wurde im Rahmen von „Supply Chain Planning“ zusammen mit einem Kooperationspartner im Bereich Logistik-

Dienstleistung erarbeitet. Dieser Partner besitzt ein großes Retourenlager mit insgesamt 1.200 Beschäftigten und einer Fläche von 13.500 m² (Abbildung 5). Trotz dieser unüberschaubar großen Anzahl an Mitarbeitern wird aktuell für die Personaleinsatzplanung ein selbst entwickeltes Tool-Set auf Basis von MS-Excel® eingesetzt.

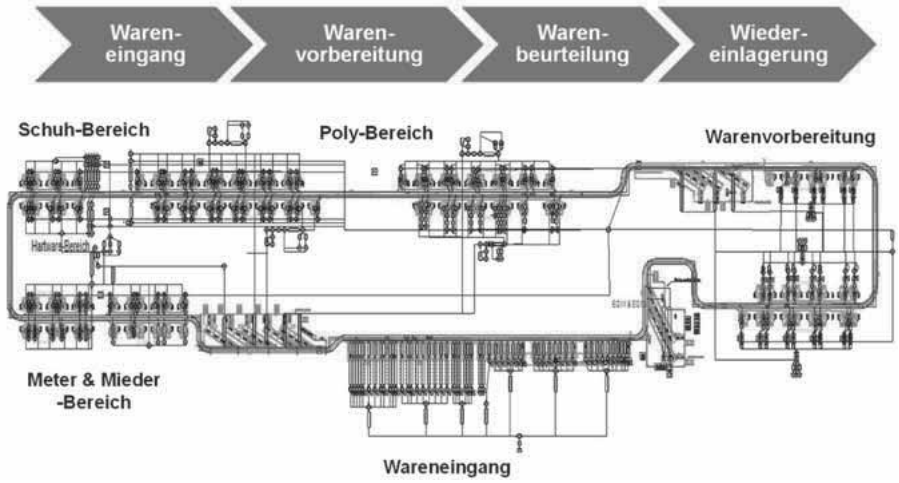


Abbildung 5: *Retourenprozess und Sortieranlage in DOSIMIS-3*

Die Einsatzplanung der Arbeitskräfte innerhalb des Retourenprozesses ist aufgrund der großen Anzahl an Mitarbeitern, der vielfältigen Rahmenbedingungen und Restriktionen sowie der notwendigen Qualifikationen der Mitarbeiter für bestimmte Bereiche komplex. Ein andere Herausforderung sind die schwankenden und saisonabhängigen Ankunftszahlen von Retouren. Der Einsatz der Mitarbeiter muss in Hinsicht auf die verfügbaren Arbeitsplätze und die installierten Kapazitäten anhand durchschnittlicher Leistungskennzahlen der unterschiedlichen Arbeitsbereiche, vertraglicher Arbeitszeiten, der Anwesenheit der Mitarbeiter sowie der Betriebszeit geplant werden. Weitergehend wird ein generiertes Ergebnis nicht bewertet. Das Ergebnis des Excel-Tools ist die Zuordnung der Mitarbeiter zu den Arbeitsbereichen und den Arbeitsschichten. Es entsteht in einem mehrphasigen Prozess, indem der Anwender immer wieder eingreift und Ergebnisse und Inputparameter nach Rücksprache mit zuständigen Gruppenleitern im Excel-Sheet verändert und anpasst. Somit ist es für den Anwender notwendig, häufig in den Erstellungsprozess des Personaleinsatzplans einzugreifen und aufgrund seines Wissens Einstellungen anzugeben oder zu verändern. Ziel ist es, die prognostizierten, ankommenden Retouren möglichst vollständig bearbeiten zu können.

Die Daten des Logistikdienstleisters dienten als Eingabe für das entwickelte Tool, das anhand dieser Vorgabe eine mögliche Lösung erzeugte. Diese Lösung war Input für das Simulationsmodell und wurde durch den Lauf des Simulationsmodells als gute Lösung bestätigt.

Die Effektivität von Personalplanung kann durch heuristische Verfahren gut unterstützt werden. Dabei ist eine personalorientierte Simulation laut Zülch et al. (1998, S. 123) ein wirksames Tool zur Analyse und Bewertung des Personaleinsatzes.

Die entwickelte Lösung ist nicht auf Anwendungsfälle im After Sales-Bereich begrenzt. Sie kann grundsätzlich in jedem Logistiksystem zur Anwendung kommen, in dem Personaleinsatzplanung erfolgt. Darüber hinaus ist auch ein Einsatz in Produktionssystemen möglich.

5 Zusammenfassung

Der hier vorliegende Beitrag zeigt die Möglichkeit der Simulation als Evaluierungsinstrument. Das hier vorgestellte Personaleinsatzplanungs-Tool erstellt im ersten Schritt mit Hilfe von heuristischen Verfahren einen Personaleinsatzplan. Diesen kann der Anwender nochmals verändern und erneut überprüfen lassen. Im nächsten Schritt hat er die Möglichkeit, die erstellten Ergebnisse mit Hilfe der Simulation zu bewerten, die tageweise arbeitet und mögliche Engpässe aufzeigen kann, die das heuristische Verfahren aufgrund des geringeren Detailierungsgrad nicht angezeigt hat. Auf diese Weise kann die Qualität der Personaleinsatzplanung noch weiter gesteigert werden.

Die Innovation liegt hierbei in der cloudbasierten Anwendung des Personaleinsatzplanungstools, so dass der Anwender hierbei keine Installation mehr durchführen muss und einfache und breitere Erreichbarkeit zu Planungswerten und -ergebnissen hat.

Das webbasierte/cloudbasierte Tool wird weiterentwickelt. Es wird ein Admin-Modus hinzugefügt, indem der Administrator weitere Möglichkeiten besitzt. So kann der Administrator die Anzahl Gesamtdurchläufe der Heuristik bestimmen. Er kann z.B. durch eine geringere Anzahl ein zeitlich schnelleres, aber meist auch schlechteres Ergebnis erzielen. Ein weiterer Aspekt des Admin-Modus ist ein Analyse-Tool. Hierbei muss der Anwender nur eine Bandbreite an Mitarbeitern angeben. Dann überprüft das Tool, welche Mitarbeiterzahl bei der Angabe des wöchentlichen Bedarfs optimal ist. Allerdings wird hierbei ein optimaler Mitarbeiterstamm berücksichtigt. Jeder Mitarbeiter ist für alle Arbeitsbereiche qualifiziert und immer anwesend.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Verbundprojektes „Supply Chain Planning“ unter dem Förderkennzeichen 01IC10L01F im „Effizienz Cluster LogistikRuhr“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Literatur

April, J.; Glover, F.; Kelly, J.P.; Laguna, M.: Practical Introduction to Simulation Optimization. In: Chick, S.; Sanchez, P. J.; Ferrin, D.; Morrice, D. J.; (Hrsg.) Proceedings of the 35th Winter Simulation Conference: Driving Innovation, New Orleans, Louisiana (USA), 7.-10. December 2003, S. 71-78.

ATOSS; FAZ; SRH FH Heidelberg: Gemeinschaftsstudie „Standort Deutschland 2006: Zukunftssicherung durch intelligentes Personalmanagement“, Berlin 2006.

Heitz, M.-J.: Ein engpaßorientierter Ansatz zur simulationsunterstützten Planung von Personalstrukturen. Karlsruhe: IFAB 1994.

Huang, H.; Lee, L.; Song, H.; Eck, B. T.: SimMan - A simulation model for workforce capacity planning. In: Computers & Operations Research 36, 2009, S. 2490-2497.

Kuhn, A.; Hellingrath, B.: Logistik und IT als wechselseitige Impulsgeber. In: Software in der Logistik 2007. München: HUSS, S.14-21.

Kuhn, A.; Hellingrath, B.; Hinrichs, B.: Logistische Assistenzsystem. In: Software in der Logistik 2008. München: HUSS, S. 20-26.

Majohr, M. F.; Rose, O.; Völker, M.: Simulationsbasierte Heuristik zur personalorientierten Steuerung komplexer Montagelinien. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008, S. 387-396.

März, L.; Weigert, G.: Simulationsgestützte Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 3-12.

Noack, D.; Rose, O.: A simulation based optimization algorithm for slack reduction and workforce scheduling. In: Mason, S. J.; Hill, R. R.; Mönch, L.; Rose, O. (Hrsg.): Proceedings of the 40th Winter Simulation Conference, Miami, Florida (USA), 7.-10. December 2008, S. 1989-1994.

o.V.: IT-unterstützte Personaleinsatzplanung. Hebezeuge Fördermittel, (2012) 52, S.11-12.

Olfert, K. :Personalwirtschaft. 7. Auflage, Herne: NWB 2011.

Rose, O.; Majohr, M. F.; Angelidis, E.; Pappert, F. S.; Noack, D.: Personaleinsatz- und Ablaufplanung für komplexe Montagelinien mit MARTA 2. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 93-104.

VDI: Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen. Berlin: Beuth 2010.

VDI: Richtlinie 3633 Blatt 6: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Abbildung des Personals in Simulationsmodellen. Berlin: Beuth 2001.

Wöhe, G: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 22. Auflage, München: Vahlen 2005.

Zülch, G.: Stand und Entwicklungstendenzen der personalorientierten Simulation. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 1-19.

Zülch, G.; Waldherr, M.: Optimierung einer feinwerktechnischen Endmontage auf Basis der personalorientierten Simulation. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 171-183.

Zülch, G.; Grobel, Th.; Heitz, M. - J.: Methodische Ansätze zur Bestimmung der Personalstruktur in kleinen Organisationseinheiten. In: Zülch, G. (Hrsg.): Vereinfachen und verkleinern - die neuen Strategien in der Produktion. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1994, S. 263-301.

Zülch, G.; Heel, J.; Lunze, G.; Hohendorf, CH.; Schweizer, W.: Personaleinsatz. In: Kuhn, A.; Rabe, M. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik: Fallbeispielsammlung. Berlin, Heidelberg: Springer 1998, S. 91-126.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulation-based Optimization for Complex Assembly Lines with Workforce Constraints

Simulationsbasierte Optimierung für komplexe Montagesysteme zur personalorientierten Ablaufplanung

Evangelos Angelidis, Daniel Bohn, Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany), evangelos.angelidis@unibw.de, daniel.bohn@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Sebastian Carl, TU Dresden, Dresden (Germany), sebastian.carl@tu-dresden.de

Abstract: The rising product diversity as well as the constantly increasing complexity of the products and assembly processes cause immense challenges to efficient planning and scheduling. The manual assembly of products with high diversity in one-of-a-kind or small batch productions by the use of multi-skilled resources can be stated as a Multi-Mode Resource-constrained Multi-Project Scheduling Problem (MMRCMPSP) with activity splitting. It is a combinatorial order problem, which is NP-hard and therefore not efficiently solvable within short runtimes for realistically problem sizes. Over the last decade, a variety of international publications indicate that there is an intensive search for solution approaches. In this paper, the authors present a simulation-based optimization platform. We implemented a variety of heuristic algorithms that generate near-optimal solutions that fulfil different predefined objective functions and constraints. We present a heuristic with emphasis on minimized slack, balanced workforce with minimal amount of elements and concurrently highest resource utilization.

1 Introduction

Modern assembly processes are characterised by complexity, product diversity, varying and alternative use of personnel and constantly changing conditions. This causes immense challenges to the efficient operational planning and scheduling. Existing potentials of flexibility and productivity especially in the use of resources are still not exploitable. Therefore we developed a simulation-based optimization platform (SBOP). Our main objective is the enhancement of the efficiency of manual assembly of products with high diversity for one-of-a-kind or small batch production, which is able to deal with the considerable dynamics in the use of personnel – especially if multi-skilled resources are required. By calculating optimal allocation variants, the best assembly plan for current objectives is generated for possible

production scenarios, even in the case of resource outages. As a result, there will be a significant increase in productivity since the assembly cycle time as well as the manpower requirements decreases.

Complex assembly processes usually have a strongly networked process structure with a large number of varying activities, competing for resources and subject to precedence relations. Moreover flexibly applicable manual and technical resources of different skill-levels are demanded by associated production systems (Evers 2002).

The relationship between the used amount of personnel resources and the resulting duration can be represented by a capacity characteristic line for each activity (*Figure 1*). Due to technological restrictions there is a specific range between the minimum of the necessary and the maximum of the applicable resources for each assembly activity. This variation of personnel allocations leads to multiple execution modes for specific assembly activities which allow a cycle time alignment for the entire system.

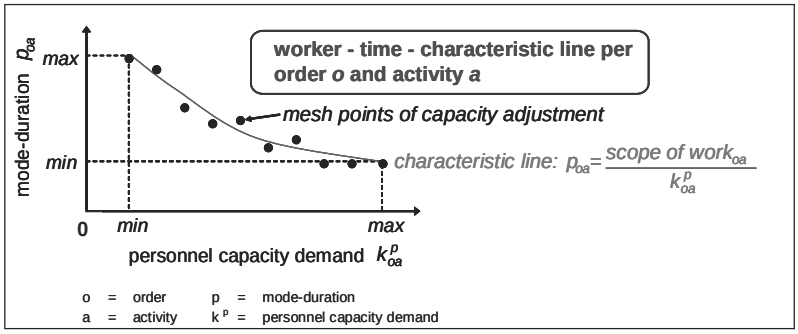


Figure 1: *Example of a capacity characteristic line (Majohr 2008)*

A production scenario is a certain planning horizon with different orders (projects). They do have associated earliest start and latest finishing dates and consist of activities, subject to precedence relations. All orders as well as activities compete for limited, multi-skilled resources. This type of problem is known as the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem (MRCMPSP). A wide variety of optimization procedures and solution approaches for the project scheduling have been suggested over the last years. Apart from special applications only a few of the available exact and heuristic procedures in literature achieved relevancy to practice. Many specifics of real production fields are often excluded.

The objective of this paper is to introduce our developed simulation-based optimization platform (SBOP). The SBOP is suitable for different kinds of assembly processes and offers a variety of heuristic algorithms and priority rules. Therefor we are able to generate near-optimal production plans that fulfil different predefined objective functions (minimized cost, minimized slack, balanced workforce, maximized resource utilization) and constraints.

The paper is organized as follows: In Section two we introduce the Simulation-based Optimization Platform (SBOP). Section three is devoted to our implementation of a simulation tool for complex assembly lines. Section four provides an overview of a

new manufacture cost function. A heuristic algorithm is presented in Section five. Section six contains the results and a discussion of future research.

2 Simulation-based Optimization Platform

In 2010 a framework for Simulation-based Optimization of assembly lines was presented in (Pappert et al. 2010). That framework aimed to offer the possibility to create various solution strategies for problems in this area while reducing complexity and development time. This concept was adjusted by making broader applications and as a result created a new tool called the Simulation-based Optimization Platform (Angelidis et al. 2012a; Angelidis et al. 2012b). The new platform is based on OSGi as a runtime environment. OSGi was selected because it offers many specifications, associated implementations and it is state of the art in software development. The platform components can communicate per event (sync or out of sync) or via direct service call between each other. The existing remote interface specification is also crucial to this research due to the fact that it allows the extension of this platform with remote interface in short time and with minimal effort. The platform has a flexible and easy modifiable meta-data model for working with several companies of different size and assembly approaches. Web technology and cloud services provide a user-friendly interface for uploading factory plans, triggering optimization runs with different parameters and visualizing the optimization results. The optimization approach in SBOP is a cycle (illustration in *Figure 2*) of the following steps:

- Creation of a scenario based on initial setups or results of previous optimization steps.
- Simulation of this scenario.
- Data preparation of the simulation results (Key Performance Indicators).
- Evaluation of simulation results.

This cycle is terminated when the target criteria or an abort criteria is reached. As a central element within SBOP, the optimizer module is responsible for the creation of scenarios which we want to simulate and the evaluation of the simulation results.

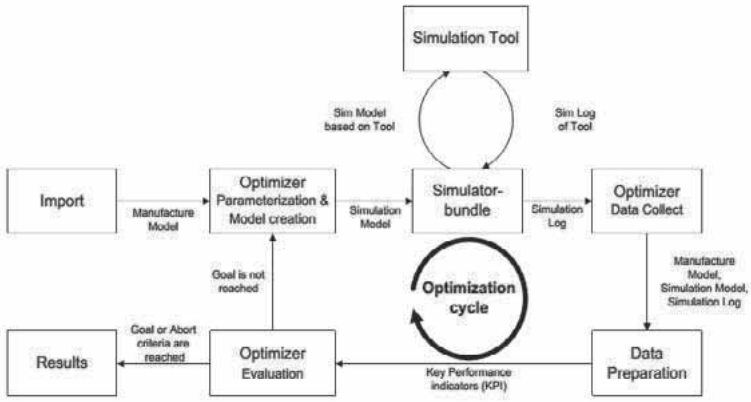


Figure 2: *Simulation-based Optimization Cycle*

The structure of the optimizer module itself is divided into three almost independent sub modules. This segmentation allows easier maintainability, exchangeability and upgradeability.

First part of the optimizer is the parameterization, which includes the actual optimization algorithms. In the parameterization the attributes for the upcoming scenario are determined. These attributes are for example activity modes, earliest start and latest end dates, dispatching rules and schedule plans. For the first optimization cycle of an optimization run, default values are being used for these parameters. The parameterization of later scenarios is a result of the used optimization algorithm and is based on the information gained in previous runs.

The second part of the optimizer module is the model creation. Based on the factory model and on the attributes from the parameterization, a new scenario is created. This scenario is then stored in the database, where the simulation module can load it.

The evaluation is the third part of the optimizer module. After processing the simulation raw data in the data preparation module, an evaluation of whether another optimization cycle is necessary or not is made. Depending on the optimization target, several Key Performance Indicators are checked, (for instance SEMI (2004)). Based on these criteria it is decided whether the simulation result and therefore the latest scenario is acceptable or not. In addition the abortion criteria, defined as maximum number of optimization cycles or elapsed time, is checked. If a target or abortion criteria is met, the optimization is terminated. In the instance that neither target criteria nor abortion criteria are met, a new optimization cycle starts.

3 A Simulation Tool for Complex Assembly Lines

Over the last years using Simulation-based Optimization we worked with several general purpose simulation tools and we created for almost all of them suitable simulation modules for the second step of the optimization cycle in Figure 1. During the project, we realized that many of them are not efficient. The results are slow runtime, high development time/costs and sometimes unrealizable modules. For these reasons we created a specific custom-built simulator designed for this problem domain

which uses the same internal meta-model as the platform. The tool supports a variety of real-world extensions and dedicated behaviour. This simulation tool is a further development of the simulation tool, which is presented in (Angelidis 2011). The main characteristics of the new simulation tool are:

- *Restart from Specific Time Point:* The goal of the optimization runtime is to gain in performance or simulation speed. As a part of the task, a mechanism was developed that allows performing execution not only from the beginning, but also from specific time points. Therefore, when a new simulation model is created according to the previous model, the tool can begin from the point of time where the first change appears, rather than starting from the beginning of the model. This method should reduce simulation runtime.
- *Activity Modes based on skills:* Activities do not have a fixed processing time but have various modes that describe their execution characteristics. The processing time is dependent on the amount of the skills of the resources. Activities have a high resource variation according to their execution and the resources are linked to a resource-qualifications table. More realistic models can be simulated. For the resource selection many rules are implemented, like choosing low cost resources, resources with a high number of availability, resources that probably will not be needed in the nearest future or resources with low utilization.
- *Internal and subcontracted workers:* The simulation model has resources defined as internal workers, who have a group of subcontracted workers. These can be used when the internal workers are scheduled but currently unavailable. This allows the optimizer to evaluate some manufacturing cost factors and analyse the due date violation over the resource utilization.
- *Resource Allocation Forecast:* Before the simulation core tries to distribute resources to the ready to start activities, it has to analyse the remaining processing time of all activities, which are already processing. If these remaining times are less than a given amount of time and their successors have a higher priority than the ready to start activities, then suitable resources will be reserved for these successors until the next event. It is a powerful way to help the activity schedule, while most of the general-purpose simulation tools only analyse the current time events ignoring the nearest future.
- *Workforce Resource Behaviour:* Two ways to execute an activity are implemented. When the state of allocated resource state changes, then the activity can find a new available or wait until the specific resources appears again.
- *Resource-Qualification Table with Dynamic State:* There is a Resource-Qualification table that allows the simulation core to select resources for every mode. This table is not static and can be changed according to many parameters that the optimizer defines (products near a due date, high utilization, high costs, etc.). It is a powerful extension to analyse the workforce behaviour under special circumstances.
- *Priority Rules:* We implemented more than forty well-known priority rules based on (Haupt (1989), Pinedo (2005), Pinedo (2008)). The calculation of the rules has a strong influence on the runtime of the simulation. Some activities have static values for some rules and we calculate them once (First In First out, Shortest/Longest Processing Time, Earliest Due Date etc.). On the other hand some rules are depended on network analysis or performance indicators and the values have to be calculated every time again as Critical Ratio, Least/Most Total

Successors etc. For that reason we implemented a dispatching rule framework for creating new rules with emphasis on optimized calculation.

4 Cost Function

As described before, the SBOP platform offers different algorithms for the scheduling of complex assembly lines. They are related to time and resource objectives, like mainly solution approaches in the field of resource constrained project scheduling problems. Since it is also necessary to complete projects cost efficient within due date we decided to develop a cost model, which serves as a new optimization goal. Some researchers present first solution approaches for cost oriented objectives. The cost analysis is mainly limited to activity costs and results are evaluated by self-generated, theoretical examples with only small and medium size instances. *Table 1* gives an overview of considered cost factors in resource scheduling problems.

Table 1: *Published papers about cost factors (* only Penalty)*

Authors	Resource Cost	Overhead Cost	Bonus and Penalty Payments	Opportunity Cost (Unused Resources)	Sub-contracting Cost for External Resources	Other Cost Factors
Resource Constrained Project Scheduling Problems and Generalization						
Chen (1994)	X	—	X*	—	—	X
Ahn and Erenguc (1998)	X	—	X*	—	—	—
Salewski (1999)	X	—	—	—	—	—
Rummel et al. (2005)	—	—	X*	—	—	X
Ke and Liu (2005)	X	—	—	—	—	—
Varma et al. (2007)	X	—	—	—	—	—
Voss and Witt (2007)	—	—	—	X	—	X
Tseng (2008)	—	—	X	—	—	—
Liu and Zheng (2008)	X	—	—	—	—	X
Multi–Mode Resource Constrained Project Scheduling Problems						
Santos and Tereso (2011)	X	—	X	—	—	—

Figure 3 shows the new developed cost function TC(x). The approach considers all cost factors which are influenceable by scheduling, like resource cost, opportunity cost (unused resources), subcontracting cost, bonus and penalty payments and

assembly overhead cost. This allows us a deep cost evaluation as well as an economic comparison of different production scenarios.

$$\textit{Minimize}\ \mathrm{TC}\ (\mathrm{x})$$

Subject to:

$$TC(x) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M_{ij}} x_{ijm}\left[\left(c_k^r * D_{ijm}^r + c_k^o * D_{ijm}^o + c_k^s * D_{ijm}^s\right) * r_{ijmk}\right]$$

$$+\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} c_o^k * Max\left[0,\left(R_{kt} - \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{m=1}^{M_{ij}} x_{ijmt} * r_{ijmk}^t\right)\right]$$

$$+\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} c_e^k * \mathrm{Max}\left[0,\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{m=1}^{M_{ij}} x_{ijmt} * r_{ijmk}^t - R_{kt}\right)\right]$$

$$+\left|\bigcup_{i=1}^{I}\bigcup_{j=1}^{J_i} t_{ij}^a\right| * c_a + Max(U_i) * H$$

$$+\sum_{i=1}^{I} Max\left[0, v_i\frac{U_i - g_i}{n}\right] - \sum_{i=1}^{I} Max\left[0, b_i\frac{g_i - U_i}{n}\right]$$

Figure 3: *Manufacture cost function*

Let:

i	order index i = 1, 2, ..., I (I ... total number of orders)
j	activity index j = 1, 2, ..., Ji (Ji ... total number of activities and the index of the last activity j of order i)
k	resource type index of the renewable resource k = 1, 2, ...,K
m	mode index m = 1, 2, ..., Mij (Mij ... total number of modes and index of the last mode of activity j of order i)
t	serial time index t = 1, 2, ..., T (T ... end of planning horizon – actual due date of the last order: T = max[Ui])
TU	time-unit, to count the cost factors
b_i	bonus for early completion – marginal gain from early completion
fst_i	earliest start date
g_i	specified delivery date
H	overhead costs
M_{ij}	amount of feasible modes m of an order i for activity j
n	number of time units t to count bonus and penalty
U_i	actual due-date of order i

v_i penalty for exceeding the specified delivery date – marginal loss from late completion

c_o^k opportunity costs of an unused resource unit of type k per time-unit t

c_a fixed general and administrative costs per time unit t to run the assembly line

c_e^k lease cost for an external resource unit of type k per time unit t

c_k^o resource cost for the usage of one resource of type k during overtime

c_k^r resource cost for the usage of one resource of type k during regular working hours

c_k^s resource cost for the usage of one resource of type k during special shifts

f_{ij} simulated earliest start date of activity j of order i

l_{ij} simulated latest start date of activity j of order i

R_{kt} available resource capacity of type k within time unit t

r_{ijmk}^t required amount of resources of type k for activity j of order i

D_{ijm}^o processing time of the activity j of order i in mode m during overtime (considering all resources and depending on the determined mode)

D_{ijm}^r processing time of activity j of order i in mode m during regular working hours (considering all resources and depending on the determined mode)

D_{ijm}^s processing time of the activity j of order i in mode m during special shifts (considering all resources and depending on the determined mode)

t_{ij}^a time unit t, in which an activity j of order m in mode m is actually processed

x_{ijmt} a binary variable, of value 1 if activity j of order i in mode m is finished in time unit t, and 0 otherwise

5 An Optimization Heuristic

Analysing the work of Majohr (2008) we found several points to improve this heuristic strategy in a way that they yield better optimization results with less optimization cycles required. We present a three-phase optimization strategy:

1. Feasibility tests of the production plan with minimal processing times and maximal personnel resources.
2. Iterative reduction until reaching minimal personnel capacities.
3. Maximal cover of the present personnel capacity curves.

In the first phase we choose the fastest modes for activities, the earliest start dates and latest end dates for orders, products and activities, as well as artificial schedule plans for resources. These schedule plans can exist or contain endless, maximum amount of resource units available in the resource pool. Under the assumption that the fastest modes will lead to the earliest possible completion time, we use this phase to validate, whether it is possible to create scenarios without due date violation under given resource pool size and timeframe. If the scenario fails at this stage, it will probably

not be possible to create a valid scenario. In that case we can use our metamorphosis algorithm, which is described later. In phase two we start with our actual optimization. The goal is to reduce the utilization of the resources without violating any due date of the orders, products and activities. The challenge is to complete production with as little slack as possible, while not violating the due dates. In our modelling approach we cannot influence the operation time of our orders directly, but we can influence the operation time of the activities by changing their modes. The method in (Majohr 2008) tries to distribute the slack of the order to its products and to its activities. In combination with the raw process time (RPT) of the activity in the previous optimization cycle, this share of slack is used to determine a new target raw process time. Based on this, we look for modes which meet this target RPT. These modes have longer RPT and lesser resource consumption. Using these modes, the activities will be slowed down, as will be the orders and subsequently their slack will be reduced. The most important part of this method is the way the slack is distributed among the activities. In (Majohr 2008) they simply spread the slack on the activities according to their share on the order's operation time. Longer activities get more share of the slack and shorter activities get less share of the slack. We extended this algorithm (Majohr 2008) by focusing especially on activities on the critical path. These activities are directly responsible for the completion date of the order. To determine whether an activity is critical or not, the Extended Critical Path Method of (Angelidis et al. 2012b) is used. At first, slack is distributed on these activities by their share on the order's operation time. Altering the operation time of critical activities alone, would be enough to influence the completion time of the order. In a second step, we also have to slow down non-critical activities as they allocate important resources as well. In contrast to the critical ones, we can slow down these activities by a much larger scale, because they are not directly tied to the order's completion date. In addition the separation of critical and non-critical activities is also relevant in case of a negative slack, which means a due date violation. When we want to speed up the order, we have to know exactly which activities are responsible for the completion time of the order and accelerate just these activities, to prevent unnecessary resource consumption. Another improvement we made is bound to the determination of the new raw process time of activities. In (Majohr 2008) they accounted the distributed slack directly as additional time for the raw process time. Unfortunately this does not consider times without production, like free shifts or weekends. In our approach we compare the activities' raw process times to their operation times and create a ratio on this. Every slack, which is distributed to an activity, will be reduced by this factor to create a more realistic target raw process time. In some special cases where the activities and the product have individual due date, the calculation of a minimum slack without any due date violation is almost impossible. On such cases we use a promising solution based on self-organization approach (Angelidis et al. 2012a). Whenever one of the other algorithms is not able to create a valid scenario, the metamorphosis algorithm enables to commit changes to the model, which cannot be done by the traditional algorithms, such as changing shift plans or adding resources. This is inspired by real production lines, where overtimes, additional shifts and external resources are used to compensate an over amount of work. To solve such a problem, we use several escalation steps (extend the duration of normal shifts or add new shifts to night or weekend, add additional resource units to the shifts, up to the maximum of units in the resource's pool, add additional resource units to the resource pool). Obviously in most cases it would not make sense to add expensive resources like

operating facilities, but it is a usual practice to add personnel based on the cost function. In the third part which is time consuming, we try to maximise the cover of the present personnel capacity curves based on the best scenarios of phase two. We analyse the time periods of the unused resources and try to minimize them according the used activities on that time. If the cover maximisation is not possible we try to keep almost constant the amount of the used resources. Because this is steps needs a lot of cycle, we use our special simulation tool to start the simulation of the scenarios from specific time points.

6 Results and Conclusion

We run several tests on the algorithms to quantify the quality of the optimization methods. The slack minimization algorithm was able to reduce the slack by 90%, while the method introduced in (Majohr 2008) reduced the slack by 88% of a comparable scenario. However our approach needed just 2 optimization cycles, while the method of (Majohr 2008) needed 6 cycles. This is mainly due to the improved slack distribution using the critical path and the removal of the effects of weekends, free shifts and breaks on the RPT calculation. Figure 4 shows the utilization values of 5 processing facilities over 5 optimization cycles and a target utilization of 60%, for the utilization balancing algorithm on the left and the combined algorithm on the right. Please note the straight development of the utilization values towards the target using the balancing approach. In comparison the utilization values in the combination method show a swinging behaviour, while the algorithm tries to reach the target value and to minimize the slack at the same time. In the given example the slack is reduced by 88%, while the method of (Majohr 2008) just reduced the slack by 78% in a comparable scenario. Currently our research focuses on the third phase.

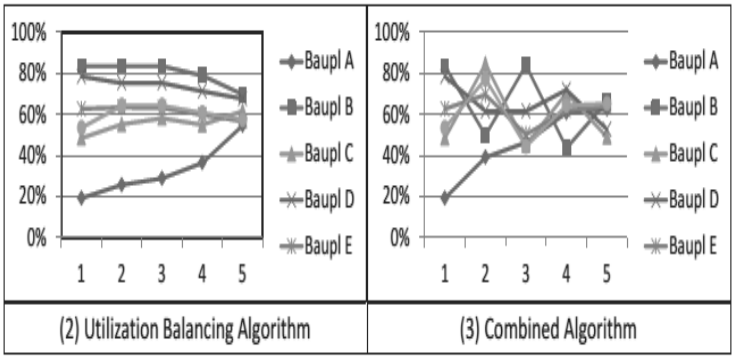


Figure 4: *Optimization with Workcentre Utilization Goal 60%*

Promotion Information

The presented cost function is a result of a current research project (393 ZBR): "Simulationsbasierte Prozesskostenrechnung zur Bestimmung kostenminimaler

Ablaufalternativen in der Montageplanung bei KMU" It is funded by the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Federal Ministry of Economics and Technology) of the Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" - AiF (Federation of Industrial Research Associations "Otto von Guericke" - AiF) on behalf of the Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL (German Logistics Association, incorporated association - BVL) and is being processed over the period 11/2011 to 09/2014.

References

Angelidis E.; Pappert F. M.; Rose O.: A Prototype Simulation Tool for a Framework For Simulation-based Optimization of Assembly Lines. In: S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White und and M. Fu (Hg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey, S. 2383–2394.

Angelidis E.; Bohn D.; Rose O. (2012a): A Simulation-based Optimization Heuristic Using Self-Organization for Complex Assembly Lines. In: C. Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose und A. M. Uhrmacher (Hg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey.

Angelidis E.; Naumann A.; Rose O. (2012b): An Extended Critical Path Method for Complex Assembly Lines. In: G. Lim und J.W. Herrmann (Hg.): Proceedings of the 2012 Industrial Engineering Research Conference.

Ahn T.; Selcuk E. A.: The resource constrained project scheduling problem with multiple crashable modes: A heuristic procedure. In: European Journal of Operational Research 107 (2), (1998) S. 250–259.

Chen V. Y.X.: A 0-1 goal programming model for scheduling multiple maintenance projects at a copper mine. In: European Journal of Operational Research 76 (1), (1994), S. 176–191.

Evers K.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage. Dissertation, University Hannover, 2002.

Haupt, R.: A survey of priority rule-based scheduling. Operations-Research-Spektrum 11 (1): 3–16. 1989

Ke H.; Liu B.: Project scheduling problem with stochastic activity duration times. In: Applied Mathematics and Computation 168 (1), (2005), S. 342–353.

Liu Z.; Zheng Y.: Resource-constrained multiple projects scheduling with the objective of minimizing activities cost. In: Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008. Chinese, S. 1027–1032.

Majohr.M. F.: Heuristik zur personalorientierten Steuerung vom komplexen Montagesysteme. PhD thesis, Dresden University of Technology, 2008

Pappert F. M.; Angelidis E.; Rose O.: Framework for simulation based scheduling of assembly lines. In: Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Piscataway, New Jersey, S. 1690–1968.

Pinedo, M. L.: Planning and Scheduling in Manufacturing and Services (Springer Series in Operations, Research and Financial Engineering). Springer. 2005

Pinedo, M. L.: Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 3rd ed. Springer. 2008

Rummel J. L.; Walter Z.; Dewan R.; Seidmann A.: Activity consolidation to improve responsiveness. In: European Journal of Operational Research 161 (3), (2005), S. 683–703.

Salewski F.: Heuristiken zur Dienstplanung bei flexibler Personalkapazität. In: OR-Spektrum 21 (3), S. 361–379.

Santos M. A.; Tereso A. P.: On the Multi-Mode, Multi-Skill Resource Constrained Project Scheduling Problem - Computational Results. In: 1st International Conference on Project Economic Evaluation, ICOPEV'2011.

SEMI: "EMI E10-0304E: Specification for Definition and Measurement of Equipment Reliability, Availability, and Maintainability (RAM)", 2004.

Tseng C. C.: Two Heuristic Algorithms for a Multi-Mode Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem. In: Journal of Science and Engineering Technology 4 (2), 2008, S. 63–74.

Voß S.; Witt A.: Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application. In: International Journal of Production Economics 105 (2), (2007), S. 445–458.

Varma V. A.; Pekny J. F.; Blau G. E.; Reklaitis G. V.: A framework for addressing stochastic and combinatorial aspects of scheduling and resource allocation in pharmaceutical R&D pipelines. In: Computers & Chemical Engineering 32 (4 - 5), (2208), S. 1000–1015.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Nutzung von Realdaten in Simulationsmodellen durch industrielle Bildverarbeitung

Use of real data in simulation models by means of industrial image processing

Emre Koç, Cyril Alias, Yakup Kalkan, Bernd Noche,
Universität Duisburg-Essen, Duisburg (Germany),
emre.koc@uni-due.de, cyril.alias@uni-due.de, yakup.kalkan@uni-due.de,
bernd.noche@uni-due.de

Carsten Stange, SDZ GmbH, Dortmund (Germany), c.stange@sdz.de

Abstract: Frequently, the application of simulation methods is not possible in small and medium sized companies because of lack of necessary data. This paper describes a method to acquire the necessary data for later use in material flow simulation of production and logistics systems by the use of industrial image processing. This solution was developed within the TiLO research project. A concept based on off-the-shelf cameras has been developed in order to capture data about the motion of objects in logistics systems. Subsequently, the recorded data is processed and prepared for use in the simulation, for which the simulator DOSIMIS-3 has been used. The solution concept has been applied and validated in an industrial use case, in which no data capturing was possible prior to the application of the presented method. By applying this method, current bottlenecks and existing potentials could be revealed with the help of simulation of the system.

1 Motivation

Die Logistik ist gekennzeichnet durch eine stetig steigende Komplexität der Verbindungen und Verflechtungen zwischen Akteuren und führt zu einer wachsenden Dynamik der Wertschöpfungsprozesse. Äußere Einflüsse und Prozessinstabilitäten machen eine erhöhte Transparenz und eine größere Reaktionsfähigkeit notwendig.

Diese Komplexität und Dynamik in der Logistik erfordern den verstärkten Einsatz von Entscheidungsunterstützungssystemen. Bei diesen Systemen handelt es sich um rechnerbasierte Konzepte, die Entscheidungsträger in Entscheidungssituationen mittels eines interaktiven Problemlösungsverfahrens unterstützen. Zielsetzung ist die Nutzung der Erfahrung der Entscheidungsträger, nicht deren Ersetzung.

2 Ausgangslage

Für die Planung und Optimierung von Logistiksystemen stellen Simulatoren eine derartige entscheidungsunterstützende Komponente dar. Simulation wird laut VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2010) als „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell“ definiert. Die Simulation bietet die Möglichkeit, Transparenz für Prozesse zu schaffen und Entscheidungsalternativen zu beurteilen (März 2011, S. 3-5). Nicht zuletzt aus diesen Gründen steigt die Bedeutung der Simulation und ihres Zusammenspiels mit den realen Prozessen. Letzteres bedingt eine korrekte und valide Abbildung der Realität im Modell.

Das Vorliegen von Ist-Daten eines realen Systems beschreibt Kühn (2006, S. 90) als einen wichtigen Aspekt für den Einsatz der Simulation zur Optimierung des laufenden Betriebs. Die Einbindung der betrieblichen Daten in Simulationsstudien und der Bedarf an Aktualität der Daten werden in der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 5 (2000) beschrieben. Um die Qualität der Simulationsstudien sicherzustellen, stellen Wenzel et al. (2008a, S. 40) ein Vorgehensmodell für die permanente Validierung und Verifikation (V&V) der Daten und des Modells vor.

Die Simulation benötigt Daten. Gerade in kleinen und mittelständischen Unternehmen bestehen diesbezüglich auch heute noch Verfügbarkeitsprobleme und Qualitätsmängel. Um diesen Aspekt auszugleichen, erfolgt die Datenbeschaffung häufig ohne systemseitige Unterstützung und mit hohem Aufwand. Dadurch beschränkt man sich dabei auf Stichproben, die ungenau und fehlerbehaftet sind. Da die Datenqualität einen direkten Einfluss auf die Modell- und damit auf die Ergebnisqualität hat, besteht ein großer Bedarf an Strategien und Konzepten zu ihrer Erhöhung (Wenzel et al. 2008b, S. 491).

Eine geeignete Möglichkeit zur Erhebung und Sicherstellung einer verlässlichen Datenbasis ist die Nutzung neuer Technologien, die eine vollständige und genaue Erfassung mit geringem Aufwand erlauben. In vielen Konzepten und Lösungsansätzen werden unterschiedliche Sensor-Technologien zur Erfassung von Realdaten für die Simulationsstudien genutzt. Für die Ermittlung der verschiedenen Betriebsdaten und Ereignisse beschreiben Aufenanger et al. (2008, S. 427-438) in ihrem Paper die Konzeption und Implementierung eines Systems zur Datenerfassung. Den Einsatz der RFID-Technologie bei der Datenerfassung in Simulationsprojekten stellt Miller et al. (2006, S. 1365-1371) exemplarisch dar. Skoogh et al. (2012, S. 181-192) zeigen Beispiele aus der Industrie für die Nutzung der Unternehmensdaten aus ERP-Systemen in der Simulation.

Im Beitrag werden die Machbarkeit der Datenerfassung und -analyse durch die industrielle Bildverarbeitung und die Nutzung der Realdaten in Simulationsstudien nachgewiesen und anhand eines Beispiels vorgestellt.

3 Lösungsansatz

Der Lösungsansatz wurde in dem vom Lehrstuhl für Transportsysteme und -logistik der Universität Duisburg-Essen geleiteten Forschungsprojekts „Tracing intelligenter LogistikObjekte“ (TiLO ist ein Teilprojekt im „EffizienzCluster LogistikRuhr“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Spitzencluster-Wettbewerbs) entwickelt. Das Forschungsprojekt beschäftigt sich mit

der Verwendung von Kamerasystemen zur Erfassung und kontinuierlichen Verfolgung von Objekten in logistischen Umgebungen. Dabei werden die relevanten Daten mit Hilfe von Kamera- und Bildverarbeitungstechnologien gesammelt, analysiert, als Informationen aufbereitet und für die weitere Verwendung an angebundene Zielsysteme übermittelt (Kalkan et al. 2013, S. 253).

Die Bildverarbeitung (Computer Vision) nutzt die Algorithmen zur Ermittlung von visuellen 2D- bzw. 3D-Informationen aus digitalen Bildern und befasst sich mit den Bildeigenschaften und den Bild-zu-Bild-Transformationen. Für die Objekterkennung, Verfolgung und Bewegungsanalyse in Bildverarbeitung gibt es vier Kriterien, die bei der Programmierung berücksichtigt werden sollen: Neben der Darstellung der Objektform und der Beachtung verschiedener Bildeigenschaften sind dies die Festlegung der Strategien für die Objekterkennung und die Berücksichtigung der bestehenden Tracing-Methoden. Weiterhin werden für die Erkennung und Verfolgung der Objekte vier Merkmale in der Bildverarbeitung betrachtet, mit deren Hilfe die Objekte aus dem Hintergrund extrahiert werden können. Diese Merkmale sind Farbe (RGB-Farbraum: Rot, Grün, Blau oder HSV-Farbraum: Farbwert, Farbsättigung, Hellwert), Kanten, Bewegung (auf Basis des Optical Flow und der dabei angegebenen Bewegungsvektoren) und Oberflächenstruktur (die Messung der Intensitätsvariation von Texturen, d.h. von Flächen dreidimensionaler Oberflächenmodelle mit zweidimensionalen Bildern) (Yilmaz et al. 2006, S. 4).

Im Forschungsprojekt TiLO werden Farb-, Bewegungs-, Konturerkennung, Template Matching, Hough-Transformation und markerbasierte Ortung als entscheidende Methoden für die Erkennung und Verfolgung der Objekte eingesetzt und in verschiedenen Anwendungsbereichen der Logistik getestet. In dem im Beitrag dargestellten Anwendungsbeispiel werden Template Matching und Hough-Transformation Methoden zur Erkennung der Objekte und Erfassung der verschiedenen Ereignisse angewendet.

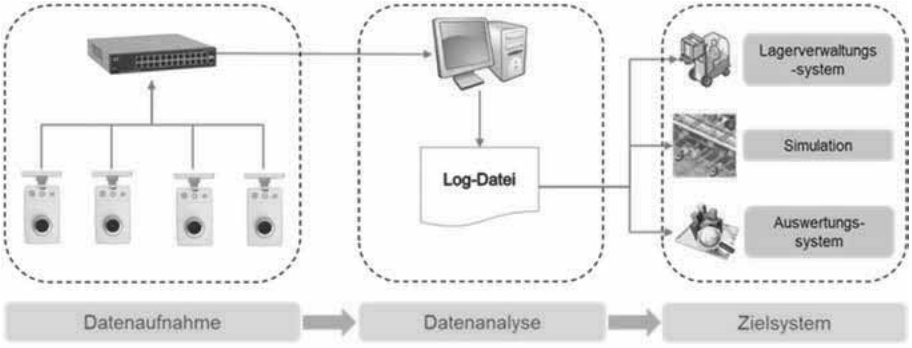


Abbildung 1: *Technisches Konzept zur Nutzung von Realdaten in Zielsystemen*

Mit Hilfe von Videokameras und den vielfältigen Möglichkeiten durch die industrielle Bildverarbeitung können unterschiedliche Objekte erkannt und verfolgt werden, so dass Realdaten eines Systems oder eines Prozesses gesammelt werden können, die ihrerseits wiederum in weiteren Zielsystem Verwendung finden können.

Das technische Konzept zur Nutzung von Realdaten in Simulationsmodellen wird in Abbildung 1 dargestellt und besteht aus drei Bereichen, der Datenaufnahme, der Datenanalyse und der Anbindung an das jeweilige Zielsystem (Kalkan et al. 2012, S. 313).

Die Datenaufnahme erfolgt in Form von Filmaufnahmen über handelsübliche Netzwerkkameras ohne eigenen Prozessor, die die Videodaten über einen Verteiler an einen Rechner übermitteln.

In der Datenanalyse werden die Videofilme mit Hilfe von verschiedenen Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet, in logistisch verwertbare Informationen umgewandelt und in einer Logdatei gespeichert. Die Bildverarbeitungsalgorithmen entstammen der freien, auf die industrielle Bildverarbeitung spezialisierten Programmbibliothek Intel OpenCV, die zudem stetige Weiterentwicklungen und eine große Programmiergemeinde aufweist.

Die Anbindung an ein Zielsystem erfolgt über den Import der Logdatei in das jeweilige Zielsystem, so dass die aus den Videofilmen gewonnenen Informationen im Zielsystem durch die jeweilige Applikation verwendet werden können. Die konkrete Ausprägung des Zielsystems ist abhängig von der Anwendungsumgebung; so können Simulationsmodelle ebenso Adressaten der Logdatei sein wie Auswertungssysteme oder Lagerverwaltungssysteme und Staplerleitsysteme. Die konkrete Anbindung der Logdateien in die Simulationsmodelle wird im Beitrag näher erläutert.

Mit Hilfe der industriellen Bildverarbeitung lassen sich die wesentlichen Informationspunkte in einem logistischen System automatisiert messen. Kamerasysteme haben den Vorteil, dass sie nicht an die Steuerung der Anlage gekoppelt sein müssen und damit unabhängig von möglichen Anlagen und existierenden Automatisierungs- und Steuerungsdaten Informationen sammeln können. So können Kamerasysteme auch Daten über Sachverhalte sammeln, die heute noch nicht oder nur mit großem Aufwand informationstechnologisch erfasst werden können.

Es ist jedoch zu bedenken, dass für die Sammlung von qualitativ einwandfreien Daten mit Hilfe von Videofilmen und Bildverarbeitungsalgorithmen auch technische Voraussetzungen bestehen (Spinnler 2012, S. 17). So bedarf eine konsistente Erfassung und Verfolgung von Objekten die Sicherstellung eines stabilen Umfelds. Ein stabiles Umfeld umfasst die stabile Installation der Kamera samt der korrekten Ausrichtung der Kamera auf das zu erkennende Objekt, die Vermeidung von Erschütterungen auf die Kamera, sowie die Sicherung geeigneter Lichtverhältnisse im Aufnahmebereich (sowohl hinsichtlich der Ausleuchtung der Erkennungsobjekte als auch der Umgebungshelligkeit) und die Vermeidung von Behinderungen der Sicht auf das zu erkennende Objekt, etwa durch Staub, Blendung oder Nebel.

Der Aufwand für die Konfiguration des Bildverarbeitungssystems kann in unterschiedlichen Umgebungen variieren. Abhängig vom Grad der Ähnlichkeit der Erkennungsobjekte und Umgebungen zu bestehenden Vorlagen aus verschiedenen Projekten lassen sich die Phase für die Anpassung der Algorithmen verkürzen und der Aufwand reduzieren.

Die Nutzung der Daten im Simulationsmodell wirkt sich direkt auf die Ergebnis- und Entscheidungsqualität aus und führt darüber hinaus zu Zeit- und

Kosteneinsparungen über den gesamten Ablauf einer Simulationsstudie. Dieses Konzept ermöglicht auch die Validierung von Systemlasten sowie die Bewertung von durchgeführten Maßnahmen anhand der Simulationsergebnisse.

Des Weiteren werden – angelehnt an VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2010) - folgende mögliche Anwendungsfelder für das entwickelte Konzept und dessen Vorteile im Beitrag skizziert:

- Aufnahme, Analyse und Verständnis von logistischen Systemen
- Schaffung von Transparenz und eines Systemverständnisses durch die Aufnahme von Systemlasten, Routing von Flüssen und Verständnis der Verhaltensweise komplexer Anlagen
- Anlagenerweiterungen und Anlagenoptimierung bei Leistungssteigerungen
- Unterstützung von Inbetriebnahme- und Abnahmeprozessen
- Monitoring und Controlling von Prozessabläufen und Ermittlung von KPIs

4 Anwendungsbeispiel

Das im Rahmen des Forschungsprojekts „TiLO“ mit einem international agierenden Industrieunternehmen entwickelte Lösungskonzept wurde in einem Anwendungsbeispiel eingesetzt. Ziele dieses Anwendungsbeispiels waren die Sicherstellung einer zuverlässigen Datenbasis und die Durchführung von simulationsbasierten Auswertungen zur Prozessoptimierung einer Engpassanlage. Um diese Ziele erreichen zu können, sollten die verschiedenen Tätigkeiten an der Anlage und deren Zeitanteile aufgenommen werden. Die Erfassung der Einsatz- und Leerzeiten und die Bestimmung der Durchsätze der Anlage gehörten ebenfalls zu den Aufgaben.

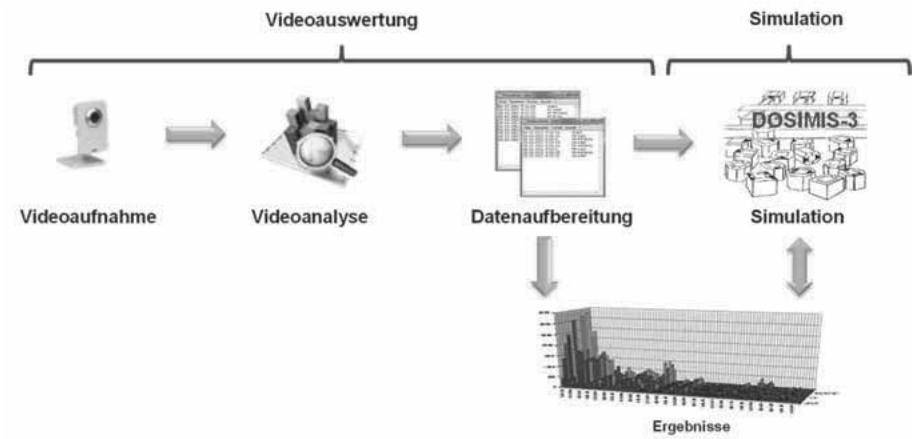


Abbildung 2: *Lösungskonzept zur Einbindung der Videodaten in die Simulation*

In Abbildung 2 wird die grundsätzliche Struktur des Lösungskonzepts dargestellt. Das im Kapitel 3 dargestellte kamerabasierte Analysesystem wurde für die automatische Datenerfassung und -analyse eingesetzt. Die Ereignisse im System

wurden erst durch die Kameras aufgenommen und als Filmmaterial an einen lokalen Rechner gesendet. Die Videoanalyse des aufgenommenen Filmmaterials erfolgt online an diesem Rechner. Als Ergebnis der Videoanalyse werden Logdateien erzeugt, die aus logistischer Sicht relevante Informationen enthalten. Dies sind typischerweise logistische Ereignisse wie Ein- oder Ausfahrten oder Zustandswechsel mit den zugehörigen Zeitstempeln. Diese Logdateien können entweder direkt zur Darstellung bzw. Analyse des Ist-Systems verwendet werden oder als Eingangsdaten für eine Simulation eingesetzt werden. Nachfolgend wird die Nutzung der Logdateien als Input für eine Simulation erläutert.

Im Projekt wurden die Prozessabläufe der Anlage mit Hilfe der Simulationssoftware DOSIMIS-3 modelliert. Neben der Auswertung der Logdateien konnte die Simulation auch für typische Fragestellungen, wie die Ermittlung von Kapazitätsgrenzen und Schwachstellen sowie zur Beurteilung der Auswirkungen von Systemanpassungen benutzt werden.

4.1 Beschreibung des untersuchten Systems

Das Anwendungsbeispiel stellt eine Verpackungsanlage dar, in der Ringe mit einem Stahlband umreift und anschließend palettiert werden. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt ein schematisches Layout der Anlage.

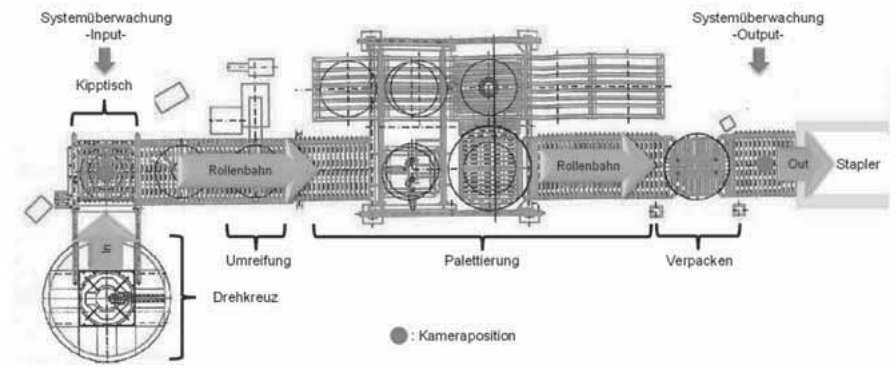


Abbildung 3: *Layout der Verpackungsanlage*

Die Prozessschritte lassen sich wie folgt skizzieren:

- Anlieferung von Ringen auf Drehkreuz
- Übernahme jeweils eines einzelnen Rings auf einen Kipptisch und Übergabe auf Rollenfördertechnik
- Liegender Transport der Ringe zur automatischen Umreifung
- Teilautomatische Palettierung der Ringe
- Abholung der Paletten per Stapler

Zur Datenermittlung wurden zwei Kameras installiert (siehe Abbildung 3). Eine Kamera befindet sich am Systemeingang oberhalb des Kipptisches und eine Kamera am Systemausgang oberhalb des Abholplatzes durch die Stapler.

Die Abbildung 4 zeigt jeweils zwei Screenshots, einmal für das Bildfenster der Kamera 1 am Systemeingang über dem Kipptisch (linkes Bild) und einmal für das Bildfenster der Kamera 2 am Systemausgang (rechtes Bild).

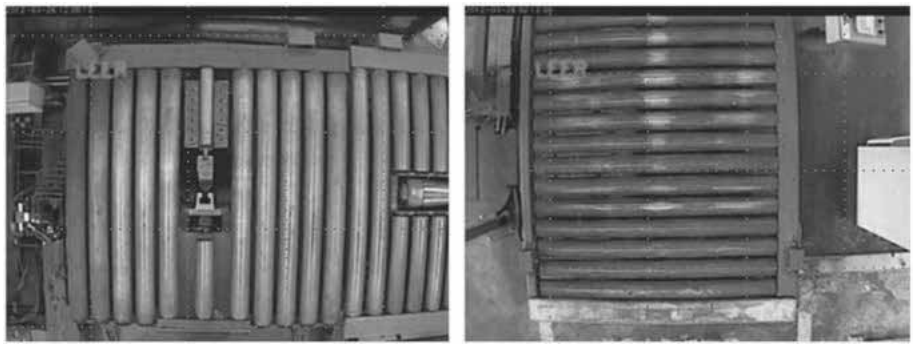


Abbildung 4: *Aufgenommene Kamerabilder (Input links, Output rechts)*

4.2 Logistische Informationen aus der Filmanalyse

Die rechnergestützte Analyse des Filmmaterials ermöglicht eine Generierung von logistischen Informationen, die im vorliegenden Beispiel in einer Logdatei gespeichert werden. Das Format der Datei ist recht simpel wie folgt definiert:

- Zeitpunkt eines Ereignisses
- Bezeichnung des Ereignisses

Eine Logdatei stellt also für jeweils eine Kamera eine Ereignisliste dar. Beispielhaft werden die möglichen Ereignisse der Kamera 1 am Systemeingang über dem Kipptisch dargestellt. Diese Logdatei enthält als mögliche Ereignisse je Zeitpunkt jeweils eine in der Tabelle 1 dargestellte Möglichkeit.

Tabelle 1: *Mögliche Ergebnisse in einer Logdatei*

Ereignis	Beschreibung
KT-Leer	Kipptisch ist leer
KT-Prozess	Kipptisch fährt hoch und beginnt mit der Übernahme eines Ringes
KT-Ring	Kipptisch hat den Ring übernommen
KT-Leer	Der zuvor übernommene Ring hat den Kipptisch verlassen
KT-Ring validiert	Ring wurde neben dem Kipptisch auf dem Rollengang erkannt. (Fall der Ring nicht auf dem Kipptisch erkannt wurde)

Für dieses Beispiel bei der Kamera 1 am Systemeingang wurde eine intelligente Analyselogik zur Echtzeitauswertung der verschiedenen Ereignisse eingesetzt. In Abbildung 5 werden diese Analyselogik und die durch die industrielle Bildverarbeitung erkannten Zustände dargestellt.

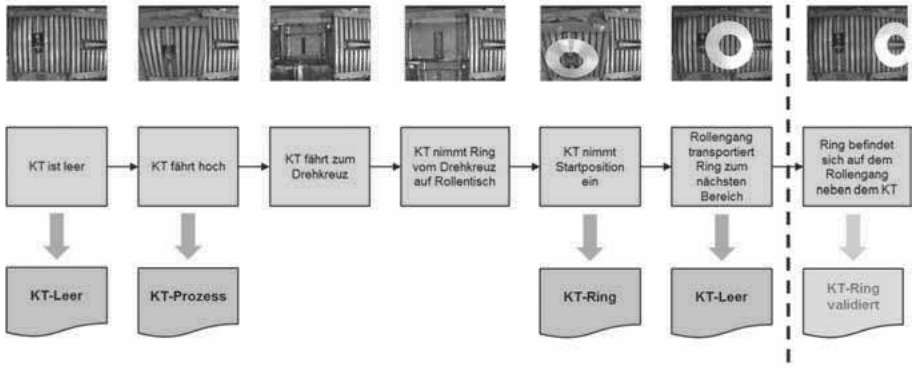


Abbildung 5: *Analyselogik und aufgenommene Ereignisse*

Ein Beispiel für eine Logdatei sieht wie in der Tabelle 2 aus.

Tabelle 2: *Logdatei*

Datum	Uhrzeit	Ereignis
03.02.2013	12:13:00	KT-Leer
03.02.2013	12:13:11	KT-Prozess
03.02.2013	12:13:27	KT-Ring
03.02.2013	12:24:21	KT-Leer
03.02.2013	12:33:44	KT-Prozess
03.02.2013	12:33:56	KT-Ring
03.02.2013	12:34:03	KT-Leer
…	…	…

Aus diesen Informationen können direkt oder mit Hilfe einer Simulation aussagekräftige Kennzahlen gewonnen werden, wie z.B. Systemdurchsätze, Auslastungen oder auch Durchlaufzeiten. Diese wiederum stellen das Systemverhalten dar und erlauben Rückschlüsse auf potentielle Optimierungspotentiale der untersuchten Anlage.

4.3 Simulationsergebnisse

Die zuvor beschriebenen Logdateien wurden als Eingabedaten für ein Simulationsmodell genutzt. Dadurch konnte das reale Systemverhalten bezüglich der Informationen aus den Logdateien realitätsnah in die Simulation integriert werden. Die nachfolgenden Charts zeigen erste Analyseergebnisse, die eine Systembewertung ermöglichen.

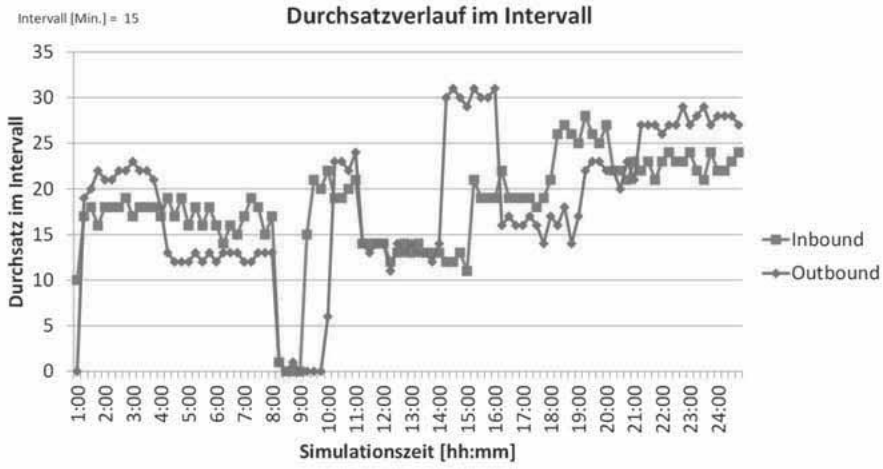


Abbildung 6: *Systemdurchsatz*

Die Abbildung 6 zeigt den Systemdurchsatz im Zeitverlauf für einen Tag, wobei der Durchsatz je 15-Min.-Intervall angegeben wird. Die Inbound Kurve zeigt den Durchsatz am Systemeingang, die Outbound Kurve den Durchsatz am Systemausgang.

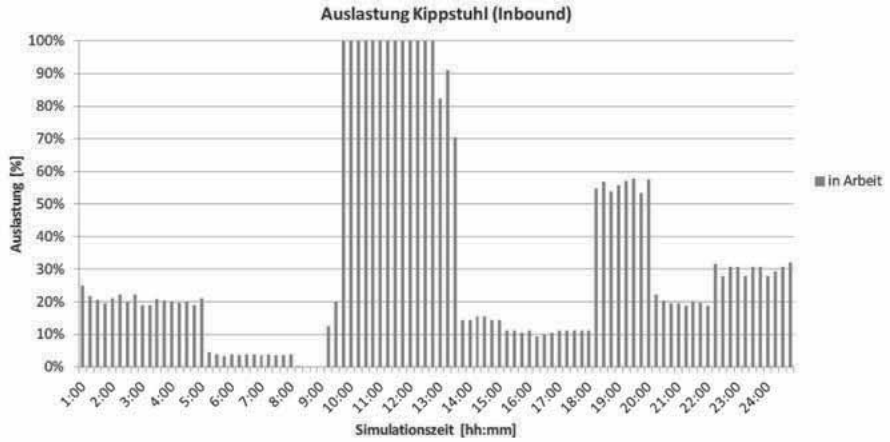


Abbildung 7: *Auslastung Systemkomponente Kipptisch*

In Abbildung 7 ist die Auswertung eines einzelnen Systemelements (Kipptisch) dargestellt. Die Darstellung zeigt die Auslastung des Kipptisches im Verlauf eines Tages. Als Auslastung wird der prozentuale Zeitanteil angegeben, in dem der Kipptisch aktiv genutzt wird, d.h. mit der Kippbewegung (gleich Hebe- bzw. Senkfunktion) beschäftigt ist. Hieraus lässt sich ableiten, ob der Kipptisch ein Engpasselement im System ist oder, ob dieser noch Anteile freier Kapazität aufweist, die eine Leistungssteigerung zulassen.

4.4 Kopplung der Videoanalyse mit der Simulation

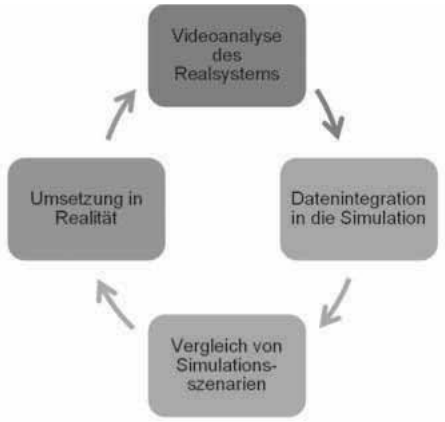


Abbildung 8: *Kopplung der Videoanalyse mit der Simulation*

Die Kopplung der Videoanalyse mit der Simulation führt zu einem Kreislauf, der es ermöglicht, die erwarteten Verbesserungen, die in der Simulation prognostiziert wurden, nach einer Umsetzung in der Realität zu überprüfen. Dies ermöglicht einen kontinuierlichen Optimierungskreislauf, der Grundlage eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses sein kann.

Die nachfolgende Auflistung zeigt eine Auswahl möglicher Simulationsszenarien:

- Szenario Ist-Situation
- Szenario Optimierung der Materialanlieferung und -abnahme
- Szenario Optimierung des teilautomatisierten Palettierprozesses

5 Ausblick auf weitere Entwicklungen und Anwendungen

Die ersten Einsätze der industriellen Bildverarbeitung erscheinen vielversprechend, so dass durch eine Erweiterung der Funktionalität und der Schnittstellen weitere Anwendungsfälle erkennbar werden:

- Datenerfassung bei diversen Planungs- und Simulationsprojekten
- Online-Monitoring & Controlling von Prozessabläufen und KPIs
- Unterstützung bei der Durchführung von verschiedenen QM-Methoden (wie z.B. Six-Sigma, KVP, Lean…)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Verbundprojektes „Tracing intelligenter LogistikObjekte“ unter dem Förderkennzeichen 01IC10L27A im „Effizienz Cluster LogistikRuhr“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Literatur

Aufenanger, M.; Wagner, J.B.; Lück, I.; Laroque, C.; Blecken, A.: Konzeption und Implementierung einer BDE-Schnittstelle zur flexiblen Datenerfassung. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008, S. 427-438.

Kalkan, Y.; Koç, E.; Alias, C.; Noche, B.: The logistic objects tracking by using image processing techniques. In: Gürsoy, G.; Tanyas, M. (Hrsg.): Proceedings of the X. International Logistics & Supply Chain Congress - Sustainability of International Logistics Systems and Supply Chain in an Era of Global Crisis, Istanbul (Turkey), 8.-9. November 2012, S. 311–317.

Kalkan, Y.; Koç, E.; Alias, C.; Noche, B.: Smart tracking of objects in logistics processes with the help of image processing. In: Clausen, U.; ten Hompel, M.; Klumpp, M. (Hrsg.): Efficiency and Logistics. Berlin, Heidelberg: Springer 2013, S. 253–260.

Kühn, W.: Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner. München, Wien: Carl Hanser 2006.

März, L.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin: Springer 2011.

Miller, M.J.; Ferrin, D.M.; Flynn, T.; Ashby, M.; White, K.P.; Mauer, M.G.: Using RFID Technologies to Capture Simulation Data in a Hospital Emergency Department. In: Perrone, L.F.; Lawson, B.; Liu, J.; Wieland, F.P. (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference (WSC), Monterey, California (USA), 3.-6. December 2006, S. 1365-1371.

Skoogh, A.; Perera, T.; Johansson, B.: Input data management in simulation - Industrial practices and future trends. Simulation Modelling Practice and Theory (2012) 29, S. 181-192.

Spinnler, K.: Leitfaden zur industriellen Bildverarbeitung. Stuttgart: Fraunhofer 2012.

VDI: Richtlinie 3633 Blatt 5: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Integration der Simulation in die betrieblichen Abläufe. Berlin: Beuth 2000.

VDI: Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen. Berlin: Beuth 2010.

Wenzel, S.; Weiss, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

Wenzel, S.; Bernhard, J.: Definition und Modellierung von Systemlasten für die Simulation logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 487-509.

Yilmaz, A.; Javed, O.; Shah, M.: Object tracking: A survey. ACM Computing Surveys (CSUR) 38 (2006) 4, Article 13.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Anwendung einer agentenbasierten Steuerungsarchitektur zur Mikromontage

Application of an agent based control architecture for micro assembly

Christian Schlette, Jürgen Roßmann, Institut für Mensch-Maschine-Interaktion,
RWTH Aachen, Aachen (Germany), schlette@mmi.rwth-aachen.de,
rossmann@mmi.rwth-aachen.de

Abstract: This contribution gives details on the motivation, concept and application of a multi agent system for the development and control of assembly processes of micro components. Starting from the evaluation of the specific requirements of micro assembly, it describes the design and implementation of an agent based control architecture in the context of a 3d simulation and visualisation system. The contribution continues to characterise the realised control features for the application depicted in figure 1 and analyses the "lessons learned": The challenges and advantages of inviting industrial partners to distributed software development, the benefits of using a 3d simulation and visualisation system as the basis of a control architecture – and why "Just make it another agent" became the driving motto of our agent based approach.

1 Einführung

Eine etablierte Vorgehensweise bei der Automatisierung neuer Montageprozesse ist es, diese zunächst für eine geringe Stückzahl zu entwickeln und zu optimieren. Indem anschließend die Zahl der eingesetzten Automatisierungskomponenten skaliert wird, stehen die Montageprozesse dann für die Serienproduktion bereit. Für die Montage von Mikrokomponenten ist dieser Weg von der Labor- zur Serienproduktion nur sehr eingeschränkt umsetzbar. Zum einen erfordern die Montageprozesse Verfahren und Genauigkeiten, die mit vertretbarem Aufwand nur manuell geleistet werden können. Zum anderen wird eine Automatisierung der Laborproduktion durch geringe Stückzahlen und einen hohen Variantenreichtum unrentabel (Photonics21 2010).

Spezialisierte Montagezellen erlauben es durchaus bereits heute, typische Mikromontageprozesse zu automatisieren und in die Hochleistung zu überführen (Fath und Pyschny 2012). Allerdings setzt der Einsatz derartiger Anlagen herstellerspezifische und zellenorientierte Kenntnisse voraus, während hier eine herstellerunabhängige und prozessorientierte Automatisierung verfolgt wird. Zur

Flexibilisierung einer derartigen spezialisierten Montagezelle setzen Fath und Pyschny eine Festkörperkinematik als Präzisionsgreifer ein, deren komplexe Bedienung hier durch die simulationsgestützten Methoden deutlich vereinfacht wird.

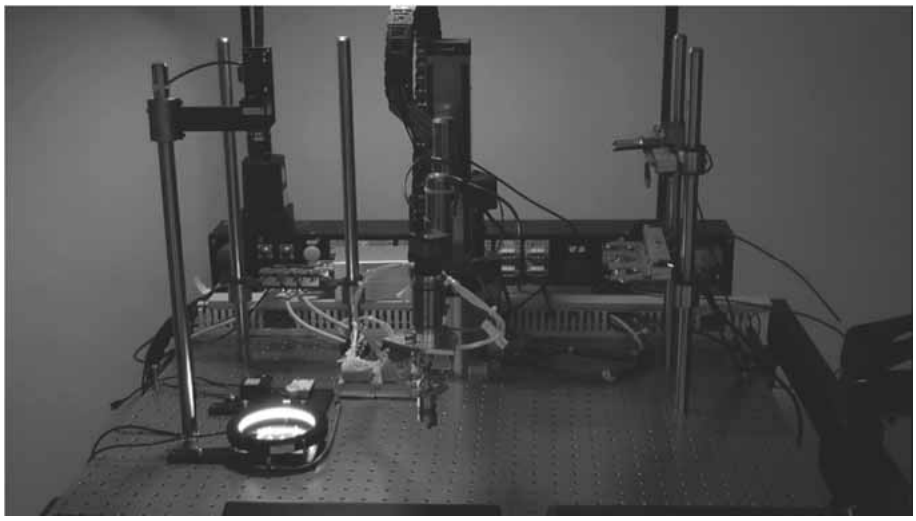


Abbildung 1: *Reale Demonstratoranlage*

1.1 Anforderungen

Die wesentlichen Anforderungen an ein System zur Prozessentwicklung und Prozesssteuerung in der Mikromontage sind Skalierbarkeit und Flexibilität. Skalierbarkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, eine in der Laborproduktion ermittelte (teil-)automatisierte Montagelösung systematisch und wirtschaftlich vertretbar auf durchsatzstärkere Automatisierungsanlagen überführen zu können. Aspekte dieser Skalierbarkeit sind die Wahl der Stückzahl und die Wahl der Leistung der eingesetzten Automatisierungskomponenten. Die Anforderung der Flexibilität betrifft zum einen die modulare Erweiterbarkeit der Architektur: Bei Bedarf sollen neue Montageverfahren und -komponenten definiert und wiederverwendbar in das System eingebracht werden können. Zum anderen muss es dem Prozessentwickler aufgrund der markanten manuellen Anteile in der Mikromontage flexibel zur Verfügung stehen, jeden Prozessschritt manuell begleiten und unterstützen zu können.

2 Stand der Technik

Die Idee des Agenten ist in der Robotik so treffend und einflussreich, dass die Begriffe „Roboter“ und „Agent“ vielerorts synonym verwendet werden – dann ist ein Agent ein intelligentes, kommunizierendes System, das mittels seiner Sensorik die physische Welt wahrnimmt und gefasste Pläne mit seiner Aktorik in dieser Umwelt umzusetzen sucht. Der robotische Agent zeichnet sich dadurch aus, dass er zum einen einen Körper besitzt und die Umwelt physisch manipuliert („Embodiment“) (Pfeifer und Scheier 2001; Pfeifer und Bongard 2007). Zum

anderen verändern sich als Resultat seiner Aktionen seine Sensorbilder und damit sein innerer Zustand, wodurch gegebenenfalls neue Reaktionen und Proaktionen ausgelöst werden („Situatedness“) (Brooks 1991; Florian 2003).

Gegenüber anderen Steuerungsansätzen zeichnen sich Anwendungen von Multi-Agentensystemen insbesondere durch einen hohen Grad an Modularität und Skalierbarkeit aus, da sich die Steuerung in MAS auf mehrere parallel agierende Agenten stützt, die Steuerungsprobleme verteilt lösen, statt eine monolithische Gesamtlösung zu verfolgen (Lüth 1998; Stone und Veloso 2000). Aufgrund dieser Eigenschaften von Multi-Agentensystemen wurde die hier beschriebene Steuerung als agentenbasierte Architektur entworfen, um den spezifischen Anforderungen des Einsatzes in der Mikromontage begegnen zu können (Roßmann et al. 2010; Schlette und Hoppen 2012).

3 Konzept

Die Steuerungsarchitektur baut auf einem hochgradig modularen Multi-Agentensystem auf, in dem jeder Agent ein Element aus der realen Produktionsumgebung repräsentiert (siehe Abb. 2).

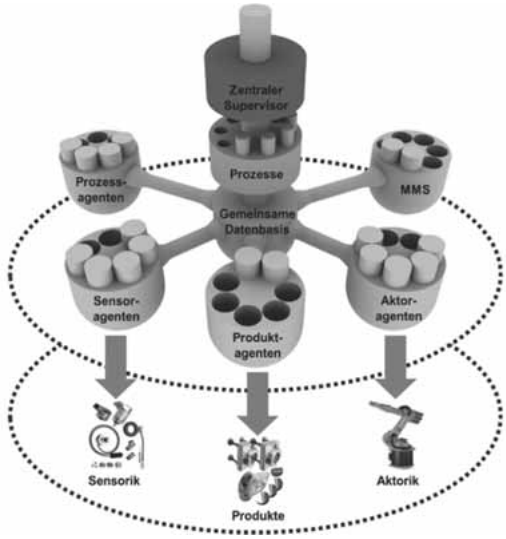


Abbildung 2: *Konzept der agentenbasierten Steuerungsarchitektur*

Die grundsätzlichen Arten von Agenten umfassen Aktor- und Sensoragenten, die aktorische (z.B. Roboter und Greifer), bzw. sensorische (z.B. Kameras) Automatisierungskomponenten abbilden, sowie Produktagenten, die der Abbildung zu montierender Mikrokomponenten dienen (z.B. optische Linsen). Zusätzlich erlauben es Prozessagenten, informationsverarbeitende Algorithmen (z.B. Kamerabildauswertungen) und Unterprozesse (z.B. sensorgeführte Roboterbewegungen) ebenfalls als eigenständige Entitäten zu anzusprechen.

Um die Anforderungen der Skalierbarkeit und Flexibilität zu adressieren, sind die Agenten als autonome, modulare Entitäten ausgelegt, die ohne großen Aufwand ausgewechselt oder hinzugefügt werden können. Systematisch können so durch die sukzessive Identifikation und Bereitstellung von Agenten (teil-)automatisierte Prozessschritte entwickelt und in die Montagelösung integriert werden. Außerdem wird durch die Repräsentation von Automatisierungskomponenten mittels Agenten von den Eigenschaften der konkreten Hardware abstrahiert, so dass die Definition von Prozessschritten weitestgehend hardwareunabhängig und wiederverwendbar erfolgt. Dazu sind alle Agenten aus zwei Teilen bestehend ausgeführt, bzw. existiert jeder Agent in zwei Umgebungen – zum einen im zentralen Multi-Agentensystem und zum anderen auf den (ggf. verteilten) Hardwaresteuerungen (siehe Abb. 3). Indem das zentrale Multi-Agentensystem im Kontext eines umgebenden 3D-Simulationssystems implementiert ist, verfügen die darin instanziierten Teile der Agenten über direkte Zugriffsmöglichkeiten auf die Datenbasis (DB) und arbeiten auf dem virtuellen 3D-Modell der gesteuerten Anlage. Die hardwareseitigen Teile der Agenten (HW) sind dagegen auf den Hardwaresteuerungen instanziiert und setzen die Methoden eines Agenten jeweils auf den gesteuerten Automatisierungskomponenten um.

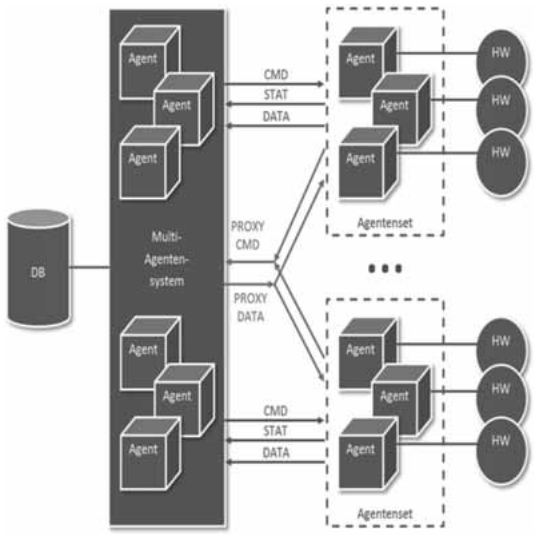


Abbildung 3: *Agentenkommunikation*

In einer alternativen Sichtweise können die Agenten im zentralen System als „Frontend“ interpretiert werden und die hardwareseitigen Agenten als „Backend“, deren konkrete Implementierung abhängig von der Hardware ist. Indem die Prozessentwicklung anhand des „Frontends“ durchgeführt wird, wird die Flexibilität des Ansatzes durch Austauschen der „Backends“ erzielt.

3.1 Agentenkommunikation

Die hardwareseitigen Agenten sind in Agentensets strukturiert, die jeweils die Kommunikation für einen oder mehrere Agenten zusammenfassen und so die

verteilte, hochmodulare Hardwaresteuerung ermöglichen. Zur Verbindung des zentralen Multi-Agentensystems mit diesen verteilten Agentensets wurde der Fokus auf die einheitliche, erweiterbare Definition eines robusten Kommunikationsprotokolls gelegt. Kernelement des Protokolls ist die Auftrennung der Kommunikation auf drei nebenläufig bediente, unidirektionale Kanäle. Über den Kommando-Kanal (CMD) übermittelt das zentrale Agentensystem Kommandos an die Agentensets bzw. die darin instanziierten hardwareseitigen Teile der Agenten. Statusmeldungen und Antworten auf die Kommandos übermitteln die Agentensets auf einem Status-Kanal (STAT) zurück an die Steuerungsarchitektur. Daneben existiert ein Daten-Kanal (DATA), auf dem die Hardwaresteuerungen sporadisch oder zyklisch Daten an das zentrale Agentensystem übermitteln können, z.B. um das Gesamtsystem im Fall eines Roboters laufend über aktuelle Gelenkwerte zu unterrichten, ohne dass dafür explizite Kommandos seitens der übergeordneten Steuerung abgesetzt werden müssten.

3.2 Simulation und Visualisierung

Durch die Implementierung der agentenbasierten Steuerungsarchitektur im Kontext eines umgebenden 3D-Simulations- und Visualisierungssystems steht es direkt zur Verfügung, ein in die Datenbasis des 3D-Simulationssystems geladenes, virtuelles Anlagenmodell mit den Funktionen der Steuerungsarchitektur zu verknüpfen (siehe Abb. 4). Zum Einsatz kommt dabei das System VEROSIM (Roßmann et al. 2013), dessen Ansatz es ist, alle zur Simulation und Visualisierung notwendigen Informationen in einer aktiven, objektorientierten Datenbasis verfügbar zu machen. Dabei bedeutet die Aktivität der Datenbasis, dass die Datenelemente über zustands- und ereignisorientierte Verbindungen direkt miteinander verknüpft werden können und Datenbasis und Simulationslogik somit eine Einheit bilden. Die Datenbasis ist als gerichteter (ggf. zyklischer) Graph strukturiert, in dem beliebige Knoten organisiert werden können. Hier modellieren die Knoten zum einen die Geometrien und Funktionalitäten der virtuellen Anlage und zum anderen sind die Agenten als Knoten von VEROSIM implementiert.

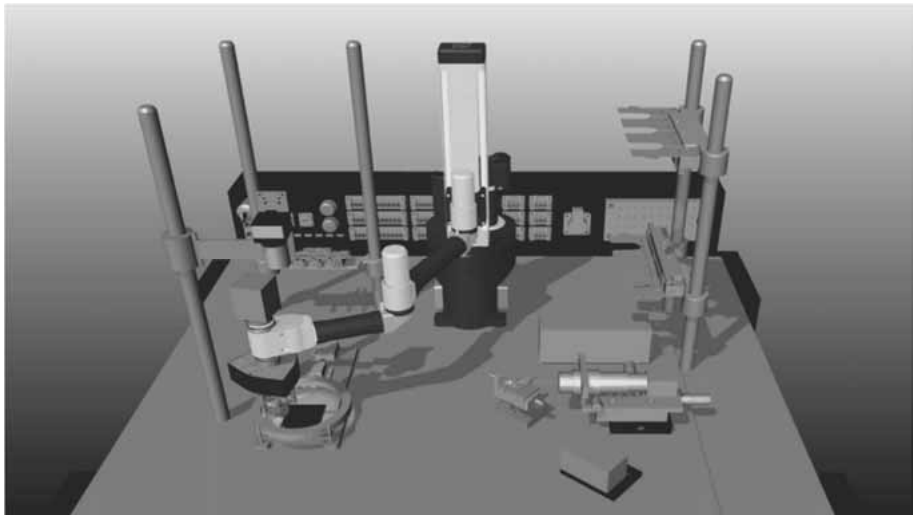


Abbildung 4: *Simulierte Demonstratoranlage*

Durch die enge Kopplung an ein Simulationssystem wird insbesondere die systematische Ko-Entwicklung eines Simulationsmodus bzw. Offline-Programmiermodus der Steuerung unterstützt, indem ergänzend zur Anbindung der realen Hardware eine entsprechende Anbindung der zugehörigen Simulationsmodelle erfolgt. Dazu sind die Agenten im zentralen Agentensystem mit einem Umschalter zwischen Simulation und Normalbetrieb ausgestattet, der es erlaubt, die simulierte Ausführung der Methoden im virtuellen Anlagenmodell durchzuführen oder die reale Ausführung der Methoden an die hardwareseitigen Agententeil zu delegieren. Zusätzlich stellt die 3D-Visualisierung das Monitoring der laufenden Anlage bereit, das z.B. detaillierte Signalweg- und Taktzeituntersuchungen erlaubt, über Schutzkörper eine frühzeitige Kollisionsdetektion unterstützt oder eine Videoaufzeichnung der Montageprozesse unterstützt. Für das Monitoring werden Zustandsgrößen der gesteuerten Automatisierungskomponenten, wie z.B. Gelenkwinkel eines Roboters, mittels der Agenten auf den Daten-Kanälen zum zentralen Multi-Agentensystem übermittelt und dort im virtuellen Anlagenmodell umgesetzt.

4 Anwendung

Abbildung 1 zeigt die mit dem Multi-Agentensystem angesteuerte Demonstratoranlage. Das Kernstück der Anlage besteht aus einem Manipulator der Fa. Schunk (Hoch und Haag 2009), der den eingangs erwähnten Präzisionsgreifer des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnologie IPT (Brecher et al. 2010; Fath und Pyschny 2012) greift, der wiederum über eine Wechselschnittstelle einen Vakuumgreifer oder andere spezifische Greifwerkzeuge für mikrooptische Linsen aufnehmen kann. Durch diese besondere Greifkette wird es ermöglicht, ein Greifwerkzeug zunächst mit der mm-Genauigkeit des Manipulators zu positionieren, um dann mit der µm-Genauigkeit des Präzisionsgreifers weiterzuarbeiten. Zusätzlich transportiert der Manipulator eine mobile Kamera zur Beobachtung des

Greifvorgangs und zwei Greiferwechselstationen dienen als Depot für die verschiedenen Greifwerkzeuge und unterstützen ihren automatisierten Austausch.

Weitere wesentliche Elemente der Anlage bestehen aus einer „Gelpak"-Station, über die ein Operator zu montierende Linsen in die Anlage einbringen kann. Die Station ist mit einer Übersichtskamera ausgestattet, deren Bilder es erlauben, Art und Lage der auf dem „Gelpak" liegenden Linsen zu bestimmen. Der Montageort für Linsen ist eine Platine, zu der die Linsen transportiert werden, um sie dort anhand von Referenzmarken „passiv" oder anhand ihrer Durchgangsleistung bei eingeschaltetem Laser „aktiv" zu positionieren und zu verkleben.

4.1 Agentenhierarchie

Gemäß dem Ansatz des Multi-Agentensystems werden alle Komponenten der Anlage jeweils durch einen eigenen Agenten in der Steuerung abgebildet bzw. gesteuert. Zunächst sind dabei die Automatisierungskomponenten von Interesse, die als Aktoren den Zustand der Anlage aktiv verändern. Diese werden durch eine gemeinsame Basisklasse „AktorAgent" angesprochen, von der gemäß den Prinzipien der objektorientierten Modellierung spezialisierte Klassen abgeleitet sind, um die spezifischen Methoden und Attribute der jeweiligen Hardware von Manipulator (Schunk) und Präzisionsgreifer (IPT) zu bedienen. Als weitere Aktoren liegen in der Anlage der Vakuumgreifer, die Greiferwechselstationen (Gex), sowie zwei Schalter für das Vakuum am „Gelpak" und eine Lichtquelle vor (siehe Abb. 5).

Als weitere Automatisierungskomponenten erfassen Sensoren den Zustand der Anlage, die hier durch eine Basisklasse „SensorAgent" angesprochen werden, bzw. durch zwei „KameraAgenten" zur Bedienung und Abfrage der Übersichtkamera am „Gelpak" (PICK) und der mitgeführten Kamera (PLACE). Die Auswertung der Kamerabilder zur Berechnung von Aufnahme- und Ablagepositionen erfolgt durch zwei entsprechende „BildAgenten" (PICK, PLACE), die wiederum von der Basisklasse „ProzessAgent" zur Abbildung von Algorithmen und komplexen Operationen mit mehreren kooperierenden Agenten abgeleitet sind. Ein Beispiel eines solchen Agenten ist der „PICKAgent", der wie ein Agent angesprochen wird und den vollständigen Vorgang einer Linsenaufnahme vom „Gelpak" durch die geeignete Koordination anderer Agenten eigenständig steuert.

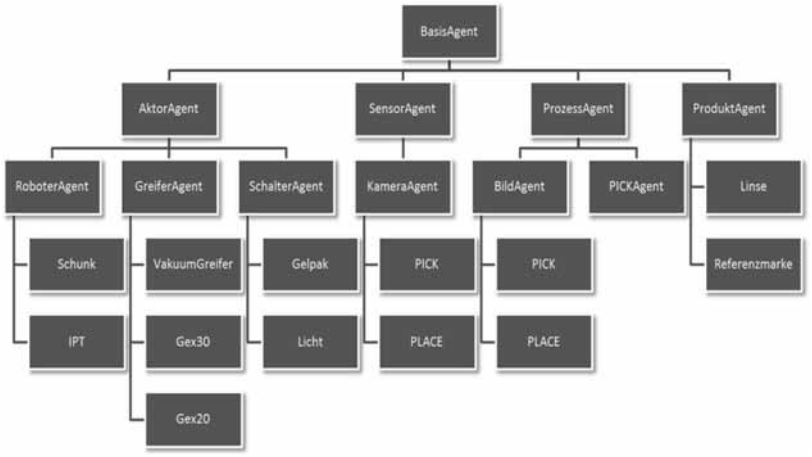


Abbildung 5: *Agentenhierarchie der Demonstratoranlage*

Schließlich werden in der Steuerung Linsen und Referenzmarken durch „ProduktAgenten“ repräsentiert, die eine Schnittstelle zu den Lage- und Größeninformationen in der 3D-Simulation darstellen. Um die Gemeinsamkeiten aller Agenten bezüglich ihrer Kennung und ihrer Kommunikation in der Agentenhierarchie zu erfassen, sind alle Agenten von einer gemeinsamen Basisklasse „BasisAgent“ abgeleitet.

4.2 Montageprozesse

Greiferwechsel – Unter Nutzung der entsprechenden Agenten entnimmt der Manipulator den Präzisionsgreifer aus der Greiferwechselstation. Anschließend entnimmt der Präzisionsgreifer den Vakuumgreifer aus der Greiferwechselstation, um die eingangs beschriebene Greifkette automatisch einzurichten. Der Greiferwechsel ist ein typischer vorbereitender Prozess, der hier aufgrund der Anbindung an das virtuelle Modell automatisch programmiert werden kann; dazu werden zum Zeitpunkt der Initialisierung die Ablagen der Greifer aus Rückmeldungen des realen Systems rekonstruiert und weitere kartesische Wegpunkte dann aus dem 3D-Modell ergänzt.

Linsenaufnahme – Der Agent der Kamera über dem „Gelpak“ wird angewiesen, ein Bild der zur Verfügung stehenden Linsen aufzunehmen; dieses Bild wird an den zugehörigen „BildAgenten“ übergegeben, der daraus die Lage der nächsten zu greifenden Linse berechnet. Diese Ziellage wird dann von der Greifkette automatisch angefahren, wobei sich die notwendigen Genauigkeiten aus der geeigneten Koordination der beteiligten „AktorAgenten“ im Zusammenspiel mit dem „Kamera-“ und „BildAgenten“ ergeben. Der Zugriff auf das virtuelle Modell erlaubt es, die ermittelte Lage der Linse sowie die zugehörige Bahn der Greifkette detailliert zu visualisieren, so dass auf dieser Basis der eigenständige, „intelligente“ Prozessagent „PICK“ entwickelt und verifiziert werden konnte.

Vorbereitung aktive Linsenjustage – Wurde eine Linse gegriffen, besteht der nächste Schritt in der Linsenjustage bzw. -montage. Dazu wird die Linse zunächst grob über die Platine verfahren, um dann anhand von Referenzmarken, die per „Kamera-“ und

„BildAgent“ vermessen werden, eine präzise Vorpositionierung für den eigentlichen Justagevorgang einzunehmen. Als Besonderheit übergibt dieser Prozess die Kommandierung der Anlage dann an den Operator, der mit Hilfe spezialisierter Benutzeroberflächen und Auswertungen die aktive Linsenjustage manuell durchführen kann, wobei eine begleitende Kollisionsdetektion im virtuellen Modell die Handhabungen des Operators schützt.

5 „Lessons learned“

Aus dem Entwicklungsprozess der Steuerungsarchitektur und ihrer Anwendung auf der gezeigten Domontratoranlage sind einige „gelernte Lektionen“ extrahierbar, die allgemeine Hinweise für die (Weiter-)entwicklung dieser und ähnlicher Steuerungsarchitekturen geben können.

5.1 Verteilte Systeme zur verteilten Entwicklung

Die Architektur ist als verteiltes System konzipiert, in dem Agenten jeweils auf verschiedenen Rechnern instanziierbar sind, so dass externe Partner ohne großen Aufwand eigene Agenten zur Hardwareanbindung realisieren können. Einerseits befähigt diese „verteilte Entwicklung“ Hardwareanbieter, ihre Automatisierungskomponenten im Kontext eines größeren Gesamtsystems zu testen und zu präsentieren, andererseits erfordert die enge Einbindung externer Partner zusätzliche technische und organisatorische Maßnahmen.

Das beschriebene Schema der Agentenkommunikation stellte sich als robust und eingängig heraus. Schlüssel zur konsistenten „verteilten Entwicklung“ war zum einen das Angebot einer zentralen Software-Bibliothek zur Agentenkommunikation, um so jedem Partner einen raschen Einstieg in die Steuerungsarchitektur zu ermöglichen; zum anderen wurde in Ergänzung zur Software-Bibliothek eine Testumgebung angeboten, um die Agentenkommunikation zu analysieren. Indem jeder Partner die von ihm implementierten Agenten vor Auslieferung mittels dieser Testumgebung verifizierte, wurde die Dauer der Inbetriebnahme an der Demonstratoranlage signifikant verkürzt.

5.2 Integration der Steuerung in ein 3D-Simulationssystem

Die durchgängige Integration der Steuerungsarchitektur in die 3D-Umgebung eines Simulations- und Visualisierungssystems erweist sich als äußerst hilfreich. Insbesondere können allein auf der Basis von CAD-Daten bereits wegweisende Layout-Entscheidungen der Anlage getroffen werden und es stehen u.a. intuitive Methoden der Offline-Programmierung bereit. Andererseits weisen CAD-Daten oft deutliche Unterschiede in Qualität, Umfang und Aktualität auf, so dass die notwendige Zusammenführung der Daten in ein gemeinsames Anlagenmodell aufwändig ist.

Insbesondere in der Entwurfsphase der Demonstratoranlage konnten allein aus der frühzeitigen Zusammenführung der CAD-Daten der verschiedenen Partner Zeit- und Materialaufwendungen eingespart werden, indem Mankos des geplanten Layouts erkannt und vor der Errichtung der realen Anlage beseitigt wurden. Da das hier eingesetzte 3D-Simulationssystem unabhängig von den CAD-Programmen der Partner war, erlaubte es der notwenige Schritt des Imports der CAD-Daten, deren

Qualität, Umfang und Aktualität zu kontrollieren. Die geschilderte Entwicklung eines virtuellen Abbilds der Anlage erlaubte zudem die funktionale Analyse des Layouts. So wurde z.B. durch Bahntests mit den virtuellen Kinematik der Greifkette deutlich, dass die Montage des Manipulators auf einem Sockel erfolgen sollte, um die Bewegungsfreiheit über dem „Gelpak“ zu erweitern. Zwar werden im Maschinenbau nahezu durchgängig CAD-Programme zum Entwurf eingesetzt – eine Rückpflege von Anpassungen der realen Anlage allerdings entfällt gerade dann häufig, falls die Anlage besonders flexibel eingesetzt werden kann und entsprechende Änderungen häufig anfallen. Daher werden die Partner in zukünftigen Einsätzen der Steuerungsarchitektur mit einem Leitfaden unterstützt, so dass sie vom Mehrnutzen der CAD-Daten ím Sinne der Offline-Programmierung oder des betriebsbegleitenden Monitorings leichter profitieren zu können.

5.3 „Just make it another agent“

Prozessagenten zur Repräsentation von Algorithmen und Unterprozessen eröffnen die Möglichkeit des Entwurfs von „virtuellen Agenten“, die keine Entsprechung in der realen Anlage haben. Obwohl zunächst nur aufgrund praktischer Erwägungen eingeführt, stellen sich die Prozessagenten als leistungsstarkes Werkzeug der modularen Prozessentwicklung heraus, das insbesondere bei den externen Partnern das Motto „Just make it another agent“ im Umgang mit der Steuerungsarchitektur inspirierte.

Nach einer Einführungsphase verselbständigte sich die zunächst zentral vorangetriebene Entwicklung neuer Agenten und wurde schließlich maßgeblich von den Partnern getragen. Dabei wurden die Partner insbesondere durch die sehr konkrete Denkfigur des „eigenständig agierenden Agenten“ ermutigt, selbst Agenten zu konzipieren und zu implementieren, um die geplanten Ziele der Demonstratoranlage zu erreichen.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde/ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (ERANET-SCALAB-02PO2840, MANUNET-DeLas-02PJ2541) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

Brecher, C.; Pyschny, N.; Behrens, J.: Flexure-Based 6-Axis Alignment Module for Automated Laser Assembly. In: Proceedings of the International Precision

Assembly Seminar (IPAS), Chamonix (Frankreich), 14.-17. Februar 2010, S. 159-166.

Brooks, R. A.: Intelligence Without Reason. In: Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), Sydney (Australien), 24.-30. August 1991, S. 569-595.

Fath, R.; Pyschny, N.: Wirtschaftlich automatisieren in der Mikromontage. Mikroproduktion (2012) 2, S.1-4.

Florian, R. V.: Autonomous Artificial Intelligent Agents, Technischer Bericht Coneural-03-01 des Center for Cognitive and Neural Studies (Rumänien), 2003.

Hoch, A.; Haag, M.: Kleinserienfertigung mit wandelbarer Mikromontage. Mikroproduktion (2009) 5, S.10-11.

Lüth, T.: Technische Multi-Agenten-Systeme: Verteilte autonome Roboter- und Fertigungssysteme. München. Hanser 1998.

Pfeifer, R.; Scheier, C.: Understanding Intelligence. 2. Auflage. Cambridge (USA), MIT Press 2001.

Pfeifer, R.; Bongard, J.: How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence. Cambridge (USA), MIT Press 2007.

Photonics21: Lighting the way ahead: Second Strategic Research Agenda. Strategiepapier der European Technology Platform Photonics21, 2010.

Roßmann, J.; Schluse, M.; Schlette, C.; Waspe, R.: Simulation-based Control. Zur Veröffentlichung angenommen von: Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme (WinTeSys), Paderborn, 18.-19. April 2013.

Roßmann, J.; Schluse, M.; Schlette, C.; Hoppen, M.: A Modular System Architecture for the Distributed Simulation and Control of Assembly Lines based on Active Databases. In: International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE), Iwate (Japan), 4.-6. Oktober 2010, S. 244-252.

Schlette, C.; Hoppen, M.: Modular Control System Architecture. In: Haag, M., Härer, S. (Schunk GmbH & Co. KG) (Hrsg.): SCALAB Scalable Automation for Emerging Lab Production: Final Report of the MNT-ERA.net Research Project SCALAB, Aachen, Apprimus 2012, S. 29-40.

Stone, P.; Veloso, M.: Multiagent Systems: A Survey from a Machine-Learning Perspective. Autonomous Robots 8 (2003) 3, S. 345-383.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Die 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation – Stellenwert und Entwicklungstendenzen

Using 3D-Visualization in the Context of Discrete-Event Simulation – Significance and Development Trends

Markus Schmitz, Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany),
m.schmitz@uni-kassel.de, s.wenzel@uni-kassel.de

Abstract: The benefits using 3D-visualization in the context of discrete-event simulation are scientifically proven and manufacturers of simulation software have been integrating advanced methods for 3D-visualization in their products for the past years. Despite these efforts the actual utilization of 3D-visualization in the context of discrete-event simulation remains unknown; experiences from university and service sector suggest that it is commonly not used. This article describes a questionnaire that queries the current situation, trends and thoughts about 3D-visualization in discrete-event simulation and presents its results. Especially differences in actual utilization, future plans and trends between small, mid-sized and large enterprises as well as between different branches of industry are worked out.

1 Einleitung

Bei der Simulation von Produktions- und Logistiksystemen spielt bereits seit vielen Jahren der Einsatz einer angemessenen Visualisierung eine wichtige Rolle. Insbesondere die Frage, welche Relevanz die Animation im Rahmen der ereignisdiskreten Simulation für die Verdeutlichung dynamischer Zusammenhänge hat, wurde bereits vor 25 Jahren kontrovers diskutiert, wie Auswertungen von Publikationen der 1980er Jahre in Wenzel (1998) oder Jessen und Wenzel (2001) belegen. Den damals schon bekannten Potenzialen der Animation für die Vermittlung von dynamischen Zusammenhängen vor Management und Entscheidern standen überwiegend Bedenken entgegen, dass ein übermäßiger Einsatz von Animationen ablenkend wirken könnte (Wenzel 1998, S. 19), dadurch kontraproduktiv sei und die Vermittlung der eigentlich relevanten Information behindere. Trotz dieser Kritikpunkte wurde beginnend in den 1990er Jahren und ergänzend zur einfachen 2D-Animation die 3D-Animation sukzessive umgesetzt. So wurde im Rahmen eines Großforschungsprojektes der Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Simulationstechnik in Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer-

Institut für Graphische Datenverarbeitung und dem Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik das Zusammenspiel Simulation und Visualisierung konzeptionell erarbeitet (vgl. Jessen et al. 1996). Der Relevanz der Vernetzung von Simulation und Visualisierung wurde durch kontroverse Debatten um ihren Stellenwert (vgl. z. B. Lorenz 1991) und durch spezielle Tagungen zum Thema Rechnung getragen (vgl. diverse Tagungsbände wie Schulze et al. 2000, Schulze et al. 2002 und weitere). Heute werden beim Einsatz der Simulation die Vorteile einer 3D-Visualisierung beispielsweise in Form einer virtuellen Begehung zur Überprüfung der Einhaltung von Richtlinien sowie für Funktions-, Kollisions- und Ergonomieuntersuchungen (Bracht et al. 2007/2008) oder für Vertrieb, Marketing und Öffentlichkeitsarbeit (VDI 3633 2009) diskutiert. Allerdings gibt es auch Gründe, aus denen die 3D-Visualisierung in der Simulation nicht zum Einsatz kommt. Neben der Notwendigkeit der entsprechenden Qualifikation der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie der Bereitstellung geeigneter Software stellt vor allem die Beschaffung von 3D-Geometriedaten ein großes Hindernis bei der Umsetzung von 3D-Modellen dar. Liegen beispielsweise CAD-Daten vor, sind diese oftmals aufgrund ihres hohen Detaillierungsgrads nicht nutzbar, sodass entweder umfangreiche Nacharbeiten oder eine Neumodellierung notwendig werden (Kremer und Liewald 2003; VDI 3633 2009; Bracht et al. 2011). Um die 3D-Visualisierung effizient nutzen zu können, müssen Möglichkeiten existieren, vorhandene 3D-Modelle für eine Visualisierung als Ergänzung zur Simulation einsetzen zu können (Bös 2008).

Auch in den Entwicklungen zur Digitalen Fabrik wird die 3D-Visualisierung heute neben der Simulationstechnik als eine wichtige Methode genannt, wobei sowohl die statische als auch die dynamische 3D-Visualisierung eine Rolle spielen (vgl. u. a. Bracht et al. 2011; VDI 4499 2008). Zudem sind 3D-Animationsfunktionen in gängigen Simulationswerkzeugen wie AutoMod (vgl. z. B. Rohrer 2002), Enterprise Dynamics (vgl. z. B. Incontrol 2010) oder Plant Simulation (vgl. z. B. Bangsow 2010) umgesetzt und werden in Simulationsstudien im Tagesgeschäft eingesetzt (vgl. z. B. König et al. 2007; Weber 2007 sowie Spieckermann 2007). Allerdings wird trotz funktionaler Unterstützungen ein hoher Aufwand bei der Erstellung einer 3D-Animation gesehen, der maßgeblich durch die Erstellung oder Konvertierung von 3D-Modellen für Maschinen und Fabrikumfeld gegeben ist (VDI 3633 2009, S. 30).

Um den aktuellen Einsatz von 3D-Visualisierungen im Umfeld der ereignisdiskreten Simulation einschätzen und Erfahrungen und Trends ermitteln zu können, wurde daher hierzu vom 06.-22. Mai 2013 eine Online-Befragung seitens des Fachgebietes für Produktionsorganisation und Fabrikplanung der Universität Kassel durchgeführt. Der Online-Fragebogen sowie die Ergebnisse der Umfrage werden im Folgenden vorgestellt. Die Befragten werden in den folgenden Abschnitten als Probanden bezeichnet.

2 Konzept der Umfrage

Im Folgenden werden zunächst der Aufbau des Fragebogens sowie die für die Befragung ausgewählten Zielgruppen erläutert. Weiterhin wird dargestellt, welche Thesen bei der Konzeptionierung des Fragebogens aufgestellt wurden.

2.1 Aufbau des Fragebogens

Der Fragebogen gliedert sich in drei Abschnitte. Im ersten Abschnitt werden Fragen zur Situation im gegenwärtigen Unternehmen des Probanden gestellt. Diese betreffen neben den technischen und organisatorischen Voraussetzungen auch die geplante Ausrichtung des Unternehmens im Bezug auf den Einsatz von 3D-Visualisierungen im Umfeld der Simulation. Der zweite Abschnitt befasst sich mit der persönlichen Einstellung des Probanden zu unterschiedlichen Aspekten und Trends im Bereich 3D-Visualisierung in der Simulation. Die Fragen sind den Tabellen 1 und 2 zu entnehmen. Im dritten Abschnitt des Fragebogens werden die Probanden gebeten, Angaben zu ihren persönlichen Daten (Geburtsjahr und Ausbildung), ihrer derzeitigen Position im Unternehmen sowie ihren eigenen Erfahrungen zu machen. Weiterhin werden sie gefragt, in welcher Weise sie in die digitale Anlagenlayoutplanung, in die Durchführung von Simulationsstudien und die Erstellung von Visualisierungen für Ergebnispräsentationen involviert sind, und gebeten, ihre Erfahrungen zur Simulationsforschung, -werkzeugentwicklung, -anwendung sowie -dienstleistung einzuschätzen. Ergänzende Fragen beschäftigen sich mit Informationen zum Unternehmen wie zugehöriger Wirtschaftszweig, primärer Tätigkeitsbereich des Probanden im Unternehmen und Angaben zum Jahresumsatz, der Mitarbeiterzahl und der Aufstellung des Unternehmens. Für Jahresumsatz und Mitarbeiterzahl liegen die Maßstäbe der Europäischen Union für die Kategorisierung in kleine (< 10 Mio. € Jahresumsatz, < 50 Mitarbeiter), mittlere (10–50 Mio. € Jahresumsatz, 50–250 Mitarbeiter) und große Unternehmen (> 50 Mio. € Jahresumsatz, > 250 Mitarbeiter) zugrunde, die Aufstellung des Unternehmens wird in regional, national und international unterschieden.

Zur Beantwortung der einzelnen Fragen werden in den ersten beiden Abschnitten verbalisierte Skalen mit einer geraden Anzahl an Antwortmöglichkeiten verwendet. Die gerade Anzahl wird bewusst verwendet, um keine neutrale Mitte als Auswahlmöglichkeit zur Verfügung zu stellen. Hierdurch müssen sich Probanden für eine Tendenz entscheiden; dies ermöglicht auch bei geringen Fallzahlen eine Angabe von Tendenzen. Für den ersten Abschnitt des Fragebogens ist zudem als Zusatzantwortmöglichkeit „Kann ich nicht beantworten“ erlaubt. Auf diese Antwortoption wird im zweiten Abschnitt verzichtet, da hier die persönliche Einstellung und Meinung des Probanden abgefragt wird.

2.2 Zielgruppen des Fragebogens und Feldbericht

Der Fragebogen wendet sich an alle Personen, die als Anwender, Dienstleister oder in der Forschung über ihre Arbeitsstelle in die Simulation involviert sind. Darüber hinaus ist es das Ziel der Umfrage, gleichermaßen Teilnehmer aus kleinen, mittleren und großen Unternehmen zu erreichen, um Unterschiede in Bezug auf die Unternehmensgröße aufdecken zu können. Um ein breites Spektrum an Probanden aus unterschiedlichen Bereichen anzusprechen, wurde die Einladung zur Teilnahme am Fragebogen per E-Mail an die Mitglieder der VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL), der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) und den Arbeitskreis Ablaufsimulation des Verbands der Automobilindustrie (VDA) mit einer Gesamtzahl von ca. 1.000 Adressen versandt und ab dem 06.05.2013 für 16 Tage online geschaltet.

Bis zum Ende der Umfrage am 22.05.2013 haben sich von den angeschriebenen Personen 160 den Fragebogen angeschaut (Rücklaufquote etwa 16 %). Hiervon haben 87 Personen den Fragebogen beendet (entspricht einem bereinigten Rücklauf von etwa 8,7 %). Eine mögliche Erklärung für den geringen Rücklauf ist, dass nur eine einmalige Einladung und keine Erinnerungen verschickt wurden. Die mittlere Bearbeitungszeit lag mit 9 Minuten 1 Sekunde (arithmetischem Mittel) unterhalb der in der Einleitung angegebenen Dauer von 10 Minuten.

2.3 Ergebnisthesen

Der Erstellung des Fragebogens liegen mehrere Thesen zugrunde; drei aus Sicht der Autoren wichtige Thesen werden im Folgenden näher behandelt:

1. Es bestehen abhängig von der Größe und der Branche eines Unternehmens Unterschiede im tatsächlichen Einsatz und den zukünftigen Plänen sowie Erwartungen in Bezug auf 3D-Visualisierung.
2. Sowohl die Verbreitung der 3D-Visualisierung als auch die ihr zugemessene Bedeutung unterscheiden sich in Forschung (universitär sowie außeruniversitär), industrieller Anwendung und Dienstleistung.
3. Da die Automobilindustrie als Vorreiter im Bereich Simulation gilt (vgl. z. B. Bayer et al. 2003), wird angenommen, dass es unter den großen Industrieunternehmen auch branchenbedingte Unterschiede beim Einsatz der 3D-Visualisierung gibt.

Weiterhin gibt es Vermutungen, dass die Ausbildung eines Probanden und die Erfahrung in unterschiedlichen Bereichen signifikante Einflüsse auf die persönlichen Einstellungen zur 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation haben.

3 Auswertung der Ergebnisse

Zunächst werden bei der Aufbereitung der Ergebnisse Analysen in Bezug auf die Größe der beteiligten Unternehmen durchgeführt. Für eine genaue Spezifizierung eines Unternehmens als kleines, mittleres oder großes Unternehmen werden gemäß Definition der EU zwei Merkmale abgefragt, Mitarbeiteranzahl und Jahresumsatz. Sofern die Probanden nur eine Angabe machen und bei der zweiten Angabe die Option „Kann ich nicht beantworten“ ankreuzen, wird eine Einordnung aufgrund des vorhandenen Kriteriums vorgenommen.

Bei der Untersuchung zeigt sich, dass lediglich acht Probanden aus mittelgroßen Unternehmen und 14 aus kleinen Unternehmen stammen. Daher wird entschieden, kleine und mittlere Unternehmen zur Gruppe KMU zusammenzufassen und nicht getrennt auszuwerten. Die Unterteilung in KMU und Nicht-KMU für Aspekte der ereignisdiskreten Simulation ist auch in gängiger Literatur zu finden (vgl. z. B. Bös 2008, Grundig 2000).

Im Rahmen dieses Artikels wird sich bei der Auswertung auf den Vergleich von Mittelwerten beschränkt (unter Annahme von Normalverteilung; Anwendung von ANOVA). Die Antwortmöglichkeiten in den ersten beiden Abschnitten („trifft zu“, „trifft eher zu“, „trifft eher nicht zu“, „trifft nicht zu“ in Abschnitt 1, „stimme zu“, „stimme eher zu“, „stimme eher nicht zu“, „stimme nicht zu“ in Abschnitt 2) werden mit den Werten eins (positivste Ausprägung) bis vier (negativste Ausprägung)

belegt. Mittelwerte über 2,5 entsprechen daher einer negativen Tendenz, Werte unter 2,5 einer positiven Tendenz.

Im Folgenden werden die Antworten zu den Abschnitten 1 und 2 des Fragebogens getrennt ausgewertet. Im Kapitel 3.1 werden die Antworten zum ersten Abschnitt im Hinblick auf Unterschiede zwischen KMU und Nicht-KMU, zwischen unterschiedlichen Branchen und zwischen Forschungsinstitutionen und Wirtschaft analysiert. Im Kapitel 3.2 wird der Abschnitt 2 des Fragebogens ausgewertet. Zusätzlich zu oben genannten Untersuchungen wird in diesem Kapitel analysiert, ob das Einsatzgebiet der Probanden im Unternehmen und die persönlichen Erfahrungen in unterschiedlichen Bereichen signifikanten Einfluss auf die gegebenen Antworten haben.

Für den Mittelwert wird im Folgenden im Text die Abkürzung MW verwendet, für die Standardabweichung die Abkürzung „+/-“. Für Signifikanzwerte wird die Abkürzung p verwendet, wobei Werte mit $p < 0{,}05$ als signifikant, mit $p < 0{,}01$ als hoch signifikant und mit $p = 0{,}000$ als höchst signifikant bezeichnet werden.

3.1 Einsatz der 3D-Visualisierung in der Simulation im Unternehmen

Die Tabelle 1 zeigt den jeweiligen Mittelwert sowie die Standardabweichung der Antworten zum ersten Abschnitt:

Tabelle 1: *Mittelwerte und Standardabweichungen (Stdabw.) zu den Fragen zum Einsatz der 3D-Visualisierung in der Simulation im Unternehmen*

	Mittelwert	*Stdabw.*
Die 3D-Visualisierung in der Simulation kommt regelmäßig zum Einsatz.	3,0	1,205
Die Vorteile einer 3D-Visualisierung in der Simulation sind bekannt.	1,9	0,852
Die technischen Voraussetzungen für eine 3D-Visualisierung in der Simulation sind vorhanden.	1,9	0,943
Die notwendigen Fachkenntnisse zur Erstellung von 3D-Visualisierungen generell (nicht speziell in der Simulation) sind vorhanden.	2,1	0,867
Notwendige 3D-Modelle für eine 3D-Visualisierung (auch ohne Simulation) sind vorhanden.	2,5	1,119
In anderen Bereichen als der Simulation kommt die 3D-Visualisierung zum Einsatz (z.B. Layoutplanung).	2,0	0,979
Aufgrund der Kosten kommt eine 3D-Visualisierung in der Simulation nicht zum Einsatz.	2,6	0,979
Der Einsatz von 3D-Visualisierung generell (nicht speziell in der Simulation) hat in den letzten 5 Jahren zugenommen.	2,1	0,966
Die Schaffung von verbesserten Voraussetzungen (z.B. Anschaffung von Hardware, Qualifikation der MitarbeiterInnen) für den Einsatz der 3D-Visualisierung im Allgemeinen ist geplant.	2,6	0,935
Es ist geplant, zukünftig verstärkt 3D-Visualisierung in der Simulation einzusetzen.	2,8	0,934

Bei der Auswertung des ersten Abschnitts, der sich mit dem Einsatz von 3D-Visualisierungen im Unternehmen beschäftigt, zeigt sich, dass obwohl die Vorteile bei der Nutzung von 3D-Visualisierungen bei der Simulation generell bekannt und überwiegend die technischen Voraussetzungen gegeben sind, dennoch 3D-Visualisierungen in der Simulation eher nicht eingesetzt werden. Bei der Analyse, ob es Unterschiede zwischen den Branchen bei der Frage nach dem Einsatz der 3D-Visualisierung in der Simulation eingesetzt gibt, sticht insbesondere die Automobilindustrie heraus, bei der 3D-Visualisierungen in der Simulation überwiegend nicht zum Einsatz kommen (MW 3,6, +/- 0,932, hoch signifikant [p = 0,003]); im Hinblick auf die anderen Branchen gibt es keine Auffälligkeiten. Auch wenn in allen Branchen der Einsatz von 3D-Visualisierungen in den letzten fünf Jahren leicht zugenommen zu haben scheint, ist weder großes Engagement in der Schaffung von verbesserten Voraussetzungen noch im geplanten zukünftigen Einsatz von 3D-Visualisierungen in der Simulation zu erkennen, wobei alle Branchen hier ungefähr gleich liegen und es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Branchen gibt.

Im Hinblick auf die Auswertung der Situation im Unternehmen bezogen auf KMU und Nicht-KMU zeigt sich, dass die 3D-Visualisierung in der Simulation in KMU generell häufiger zum Einsatz kommt (KMU: MW 2,4, +/- 1,182, Nicht-KMU: MW 3,3, +/- 1,132). Abgesehen von der Frage, ob die Vorteile einer 3D-Visualisierung in der Simulation im Unternehmen bekannt sind (KMU: MW 1,5, +/- 0,602, Nicht-KMU: MW 2,0, +/- 0,894) gibt es bei allen weiteren Fragen aus dem ersten Abschnitt von Probanden aus KMU eine minimal größere Zustimmung (MW im Schnitt um 0,17 kleiner), jedoch ist bei diesen Fragen eine Aufteilung nach KMU oder Nicht-KMU nicht signifikant ($p > 0,25$). Daher ist davon auszugehen, dass die Gründe, die laut Unternehmen für oder gegen einen Einsatz sprechen, nicht davon abhängen, ob ein Unternehmen ein KMU ist oder nicht.

Aufgrund der geringen Fallzahlen wurden für die obigen Auswertungen die national (11,1 %) und regional (2,2 %) aufgestellten Unternehmen zur Gruppe „national“ zusammengefasst. Dennoch zeigen sich in der Auswertung keinerlei signifikante Unterschiede zwischen national und international agierenden Unternehmen.

3.2 Persönliche Einstellung und Erfahrung zur 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation

Die Fragen im zweiten Abschnitt beziehen sich auf die persönliche Einstellung und Erfahrung der Probanden, daher erfolgt eine Auswertung zunächst im Hinblick darauf, inwieweit die Probanden persönlich in die digitale Layoutplanung, die Durchführung von Simulationsstudien und die Erstellung von Ergebnisvisualisierungen involviert sind. Weiterhin wird analysiert, ob Unterschiede im Hinblick auf die Erfahrung des Probanden in den Bereichen Simulationsforschung, -werkzeugentwicklung, -anwendung und -dienstleistung bestehen.

Wie Tabelle 2 zeigt, wird bei den Aussagen, dass 3D-Visualisierung Vorteile bei der Präsentation von Simulationsergebnissen hat, dass aufgrund zunehmender Datenmengen Auswertungen und Visualisierungen umfangreicher werden und dass eine Präsentation aus 2D-Folien und 3D-Visualisierungen sehr sinnvoll ist, generell eher zugestimmt. Allerdings stimmen die Probanden ebenfalls eher zu, dass es an einfachen Werkzeugen zur Erstellung von 3D-Visualisierungen fehlt. Die

Integration von 3D-Visualisierungen in Simulationswerkzeuge wird allgemein als eher positiv gesehen. Dass eine mehrfache Nutzung von 3D-Daten die Kosten signifikant senken kann, sehen die meisten Probanden. Ebenso können sich die meisten Probanden vorstellen, 3D-Visualisierungen bei Ergebnispräsentationen einzusetzen. Im Mittel neutral bewertet werden Aussagen darüber, ob die 3D-Visualisierung zukünftig eine notwendige Softwarekomponente in der ereignisdiskreten Simulation darstellen soll und ob das Einbeziehen unterschiedlichen Zielgruppen das Erstellen passender Visualisierungen erschweren wird. Eher keine Zustimmung gibt es zu der Aussage, dass die Vorteile einer 3D-Visualisierung in der Simulation die entstehenden Kosten überwiegen.

Tabelle 1: *Mittelwerte und Standardabweichungen (Stdabw.) zu den Fragen zur persönlichen Einstellung und Erfahrung*

	Mittelwert	*Stdabw.*
Die 3D-Visualisierung hat deutliche Vorteile bei der Präsentation von Simulationsergebnissen.	1,9	1,015
Die Vorteile einer 3D-Visualisierung in der Simulation überwiegen die dadurch entstehenden Kosten.	2,8	0,828
Es fehlt an einfachen Werkzeugen zur Erstellung einer 3D-Visualisierung in der Simulation.	2,1	0,985
Die 3D-Visualisierung ist zukünftig eine notwendige Softwarekomponente der ereignisdiskreten Simulation.	2,5	0,977
Die mehrfache Nutzung von 3D-Daten, z.B. in der Layoutplanung, Simulation und bei der Visualisierung von Simulationsergebnissen, kann die Kosten signifikant senken.	1,7	0,705
Die Integration der 3D-Visualisierung in gängige Simulationswerkzeuge ist eine sinnvolle Lösung.	2,0	0,832
Ich kann mir vorstellen, 3D-Visualisierungen bei der Ergebnispräsentation von Simulationsstudien einzusetzen.	1,8	0,889
Für eine Präsentation von Simulationsergebnissen ist eine Kombination aus 2D-Folien und 3D-Visualisierungen sehr sinnvoll.	2,0	0,858
Das Einbeziehen unterschiedlicher Zielgruppen in eine Simulationsstudie erschwert das Erstellen passender Visualisierungen.	2,6	0,935
Aufgrund zunehmender Datenmengen durch komplexere Simulationsmodelle werden Auswertungen und Visualisierungen immer umfangreicher.	1,8	0,820

Im Folgenden wird aufgezeigt, inwiefern die Antworten zu den Aussagen aus Tabelle 2 von der Involvierung in unterschiedliche Tätigkeiten und der Einschätzung der eigenen Erfahrung in verschiedenen Bereichen abhängen.

Tabelle 2: *Involvierung der Probanden in unterschiedliche Tätigkeiten in Prozent*

Inwiefern sind Sie involviert in die…	*stark*	*eher stark*	*eher wenig*	*wenig/ gar nicht*
digitale Layoutplanung von Anlagen?	16%	24%	41%	19%
Durchführung von Simulationsstudien?	59%	20%	15%	6%
Erstellung von Visualisierungen für Ergebnispräsentationen?	35%	34%	22%	9%

Tabelle 3 zeigt, wie viel Prozent der Probanden ihre Involvierung in die digitale Layoutplanung von Anlagen, die Durchführung von Simulationsstudien und die Erstellung von Visualisierungen für Ergebnispräsentationen jeweils mit stark, eher stark, eher weniger oder wenig / gar nicht eingeschätzt haben. Zusammenhänge mit den Antworten zu den persönlichen Einstellungen und Erfahrungen können aufgrund schlechter Signifikanzwerte nicht entdeckt werden.

Tabelle 3: *Einschätzung der eigenen Erfahrung in Prozent*

Wie bewerten Sie Ihre Erfahrungen im Bereich…	*viel*	*eher viel*	*eher wenig*	*wenig/ keine*
Forschung zur ereignisdiskreten Simulation?	25%	25%	25%	25%
Simulationswerkzeugentwicklung?	17%	26%	32%	25%
Simulationsanwendung?	52%	28%	14%	6%
Simulationsdienstleistung?	29%	28%	24%	19%

Tabelle 4 zeigt, wie die Probanden ihre eigene Erfahrung in den vier Bereichen einschätzen. Bei der Auswertung in Hinblick auf die gegebenen Antworten zeigt sich, dass Probanden, die nach eigener Einschätzung viel Erfahrung im Bereich der Forschung zur ereignisdiskreten Simulation besitzen, eher nicht zustimmen, dass es an einfachen Werkzeugen fehlt (MW 2,9, +/- 0,912). Dies unterscheidet sich stark von Probanden mit eher viel (MW 1,9, +/- 0,771), eher wenig (MW 1,8, +/- 0,984) und wenig bis keiner Erfahrung (MW 1,6, +/- 0,630). Die Unterschiede sind zudem höchst signifikant ($p = 0{,}000$). Weiterhin zeigt sich, dass je mehr Erfahrung ein Proband mit der Entwicklung von Simulationswerkzeugen hat, umso weniger stimmt er der Aussage zu, dass die Integration von 3D-Visualisierungen in gängige Simulationswerkzeuge eine sinnvolle Lösung ist (viel Erfahrung: MW 2,4, +/- 1,021, eher viel: MW 2,2, +/- 0,873, eher wenig: MW 1,9, +/- 0,748, wenig / keine: MW 1,6, +/- 0,499. Signifikanz: $p = 0{,}012$), auch wenn alle Werte über 2,5 und damit eher im zustimmenden Bereich liegen. Die Erfahrung mit Simulationsanwendung oder -dienstleistung stellt im Rahmen dieser Umfrage kein Kriterium für Unterschiede in Bezug auf Einstellungen und Erfahrungen dar, da keine ausreichenden Signifikanzen gefunden werden konnten.

Abschließend werden die Umfrageergebnisse zum zweiten Abschnitt in Bezug auf Branchenabhängigkeiten analysiert. Hierbei zeigt sich, dass die Frage nach der Branche nur bei einer der zehn Aussagen signifikant ist. Der Aussage, dass aufgrund zunehmender Datenmengen und komplexerer Simulationsmodelle auch Auswertungen und Visualisierungen immer umfangreicher werden, stimmen Probanden aus der Automobilindustrie (MW 1,5, +/- 0,679) und den Hochschulen (MW 1,6, +/- 0,642) überdurchschnittlich stark zu. Bei Probanden aus anderen Branchen ergeben sich Mittelwerte zwischen 2,0 und 2,4. Aufgrund der hohen Anzahl an Probanden aus der Automobilindustrie (44 von insgesamt 87 Antworten) ergibt sich ein Mittelwert für alle Probanden von 1,8 +/- 0,846. Alle anderen Fragen zu persönlicher Einstellung und Erfahrung sind in Bezug auf die unterschiedlichen Branchen nicht signifikant ($0{,}1 < p < 0{,}62$); auch in Bezug auf KMU oder Nicht-KMU gibt es keine signifikanten Zusammenhänge.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung des Online-Fragebogens hat ergeben, dass zwar die Vorteile einer 3D-Visualisierung in den Unternehmen bekannt und die technischen Voraussetzungen weitgehend vorhanden sind, sie aber dennoch überwiegend nicht eingesetzt wird. Auch wenn die Nutzung in den letzten Jahren zugenommen hat, scheint das Thema wenig Wichtigkeit zu haben; ein verstärkter Einsatz ist eher nicht geplant. Die These, dass es hierbei signifikante Unterschiede zwischen KMU und Großunternehmen gibt, ist durch die Auswertung des Fragebogens nicht zu belegen. Auch die Annahme, dass die Automobilindustrie, die im Bereich der ereignisdiskreten Simulation eine Art Vorreiterrolle einnimmt, ebenso im Bereich 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation diese Rolle übernimmt, hat sich nicht bestätigt; im Gegenteil scheint die 3D-Visualisierung in der Automobilindustrie weniger als in anderen Branchen eingesetzt zu werden. Weiterhin zeigt sich, dass in Bezug auf die mit dem Fragebogen untersuchten Zusammenhänge keine signifikanten Unterschiede zwischen Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Wirtschaft auszumachen sind.

Im Hinblick auf die persönlichen Einstellungen und Erfahrungen der Probanden bestätigt sich hingegen, dass es eine Zustimmung zu der Aussage gibt, dass Auswertungen und Visualisierungen zunehmend komplexer werden, und dass viele bereit wären, 3D-Visualisierung einzusetzen. Skepsis besteht hingegen überwiegend darin, ob Aufwand und Nutzen in einem vernünftigen Verhältnis stehen; zudem lässt sich ableiten, dass vielen Probanden geeignete Werkzeuge fehlen. Der beste Weg für eine Ergebnispräsentation scheint eine Kombination aus 2D-Folien und 3D-Visualisierungen zu sein, wobei die Integration von 3D-Visualisierungen in gängige Simulationswerkzeuge überwiegend als sinnvoll angesehen wird. Weiterhin wird allgemein zugestimmt, dass die mehrfache Nutzung von 3D-Daten die Kosten für die Erstellung von 3D-Visualisierungen signifikant senken kann.

Auf weitere über die Untersuchung der genannten Thesen hinausgehende Auswertungen der Umfrageergebnisse muss an dieser Stelle aus Platzgründen verzichtet werden; im Rahmen einer Dissertation werden ergänzende Untersuchungen erfolgen. Entsprechend der ermittelten Ergebnisse werden in weiteren Forschungen des Fachgebietes insbesondere einfache, kostengünstige Werkzeuge zur Erstellung von 3D-Visualisierungen im Vordergrund stehen.

Literatur

Bangsow, S.: Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk. Berlin: Springer, 2010.

Bayer, J.; Collisi, T.; Wenzel, S.: Simulation in der Automobilproduktion. Berlin: Springer, 2003.

Bös, M.: Methoden der Digitalen Fabrikplanung – ein praxisorientierter Ansatz für KMU. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart, Fraunhofer IRB, S. 407-415, 2008.

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Berlin: Springer, 2011.

Bracht, U.; Reichert, J.; Kruse, C.: Unterstützung der Planung und Steuerung großer Werkstattfertigungen durch Ablaufsimulation. In: Simulationswissenschaftliches Zentrum der Technischen Universität Clausthal (Hrsg.): Jahrbuch 2007-2008. Unter: http://www.simzentrum.tu-clausthal.de/files/SWZ-Jahrbuch-2007-2008.pdf, zuletzt abgerufen am 27.02.2013, 2007/2008.

Grundig, C. G.: Anwendung der Simulationstechnik in der Praxis von KMU (Fallbeispiel). In: Merlins, K.; Rabe, M. (Hrsg.): The New Simulation in Production and Logistics. Berlin, Fraunhofer IPK, S. 117-126, 2000.

Incontrol Simulation Solutions: Quickstart Guide to 3D animation. Unter: http://www.incontrolsim.com/academy/downloads/documentation/tutorials/advanced/30-quickstart-guide-to-3d-animation/, zuletzt abgerufen am 01.03.2013, 2010.

Jessen, U.; Krömker, D.; Loseries, F.; Luckas, V.; Wenzel, S.: Realitätsnah planen – Die 3D-Visualisierung als ideale Ergänzung der Simulation. In: Visualisierungsverfahren beim Einsatz der Simulationstechnik in Produktion und Logistik, Tagungsband zum Workshop am 11.06.1996 im Rahmen der 7. ASIM-Fachtagung, 11.-13.06.1996 in Dortmund. Dortmund, Praxiswissen, 10 Seiten, 1996.

Jessen, U.; Wenzel, S.: The Integration of 3-D Visualization into the Simulation-based Planning Process of Logistics Systems. In: Simulation 77 (2001), 3-4, S. 114-127, 2001.

König, M.; Beißert, U.; Bargstädt, H.-J.: Ereignis-diskrete Simulation von Trockenbauarbeiten – Konzept, Implementierung und Anwendung. In: Franz, V. (Hrsg.): 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft. Kassel University Press, S. 15-27, 2007.

Kremer, A., Liewald, J.: 3D-Animationen in der Ablaufsimulation. In: Bayer, J.; Collisi, T.; Wenzel, S. (Hrsg.): Simulation in der Automobilproduktion. Berlin: Springer, S. 189-196, 2003.

Rohrer, M. W.: Simulating reality using AutoMod. In: Yucesan, E.; Chen, C.-H.; Snowdon, J. L.; Charnes, J. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. IEEE, S. 173-181, 2002.

Schulze, T.; Lorenz, P.; Hinz, V. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2000. SCS, Ghent, 2000.

Schulze, T.; Schlechtweg, S.; Hinz, V. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2002. SCS, Ghent, 2002.

Spieckermann, S.: Wie soll ich glauben, was ich nicht sehe – die Rolle der Animation im Simulationsalltag. In: VDI-Gesellschaft Fördertechnik

Materialfluss Logistik (Hrsg.): Modellbildung und Simulation in der Praxis, VDI-Berichte Nr. 1989. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 45-53, 2007.

VDI 3633: VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.): VDI 3633, Blatt 11: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Visualisierung. VDI-Handbuch Fabrikplanung und -betrieb, Bd. 2. Berlin: Beuth, 2009.

VDI 4499: VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.): VDI-Richtlinie 4499, Blatt 1: Digitale Fabrik – Grundlagen. VDI-Handbuch Fabrikplanung und -betrieb, Bd. 2. Berlin: Beuth, 2008.

Weber, J.: Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD Daten. Dissertation. Universität Dortmund, 2007.

Wenzel, S.: Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungswerkzeuge. In: Kuhn, A. (Hrsg.): Unternehmenslogistik. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1998.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Ein Ansatz zur Verifikation von Materialflusssystemen durch Model Checking

An Approach to Verification of Material Handling Systems using Model Checking

Karsten Turek, TU Dresden, Dresden (Germany), karsten.turek@tu-dresden.de

Thomas Klotz, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Institutsteil Entwurfsautomatisierung, Dresden (Germany), thomas.klotz@eas.iis.fraunhofer.de

Thorsten Schmidt, TU Dresden, Dresden (Germany), thorsten.schmidt@tu-dresden.de

Bernd Straube, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Institutsteil Entwurfsautomatisierung, Dresden (Germany), bernd.straube@eas.iis.fraunhofer.de

Abstract: The design of properly working material handling systems (MHS) is a difficult process as these systems consist of a vast number of elements with dedicated controls. While these systems are usually validated using simulation, formal verification using model checking provides alternative means for in-depth analysis of the system behaviour. The approach is based on a modelling methodology considering material handling elements and their controls. The paper discusses the enhancement of discrete-event simulation with this approach, resulting in advanced means to analyse material handling controls, and gives an example.

1 Einleitung und Motivation

Die Aufgabe von Materialflusssystemen ist das gesteuerte Transportieren von Stückgut zur Versorgung einer Fertigung (z. B. das Transportsystem einer Computerchip-Fabrik) oder innerhalb eines Logistiksystems (z. B. das Gepäcktransportsystem im Flughafen). Die ereignisdiskrete Simulation ist als Werkzeug zur Analyse der Eigenschaften und Zusammenhänge des Materialflusses in Fertigungs- und in Logistiksystemen etabliert (Banks et al. 2010). Teilweise erfolgt die Entwicklung einer Materialflusssteuerung unmittelbar im Simulationsmodell mit anschließender Übertragung in die reale Anlage. In der Emulation dient das Simulationsmodell als Ersatz realer System- und Steuerungsbestandteile (Versteegt und Verbraeck 2002; Kemper und Spieckermann 2010).

Die algorithmische Ausgestaltung der Materialflusssteuerung besitzt einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Systems, kann aber hinsichtlich ihrer

Korrektheit nur durch aufwändige Verfahren der Fehleranalyse und Modellevaluierung überprüft werden (vgl. Kemper und Tepper 2006). Die Schwerpunkte bisheriger Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Materialflusssimulation liegen im Bereich Validierung und *informelle* Verifikation, wie Veröffentlichungen (z. B. Rabe et al. 2008) zeigen.

Validierung korrespondiert mit der zentralen Anforderung an ereignisdiskrete Simulation, das dynamische Systemverhalten in Raum und Zeit hinreichend realitätsnah abzubilden, um quantitative Aussagen zur Leistungsfähigkeit des Systems (Transportmengen und Transportzeiten) zu erhalten. Der gesamte Zustandsraum der Materialflusssteuerung wird dabei weder systematisch noch vollständig betrachtet. Die ereignisdiskrete Simulation ist deshalb methodisch nicht geeignet, den vollständigen Nachweis der Korrektheit der Steuerungsalgorithmen zu führen.

Der nachfolgende Artikel skizziert ein neues Verfahren zur Qualitätssicherung der Steuerung von Materialflusssystemen. Das Verfahren basiert auf dem Einsatz der formalen Verifikationstechnik Model Checking zur Systemprüfung. Model Checking realisiert eine vollständige Prüfung des Systemverhaltens durch ein automatisches Beweisverfahren. Die formale Verifikation durch Model Checking kann die ereignisdiskrete Simulation zur Analyse von Materialflusssystemen ergänzen und liefert Ergebnisse, die für eine Verbesserung der Qualität von Materialflusssteuerungen nutzbar sind.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: Eine verifikationsorientierte Form der Modellierung von Materialflusssystemen wird vorgestellt. An einem Beispiel wird die grundsätzliche Eignung des Konzepts für die Verifikation von Systemen realer Größenordnung dargelegt. Anschließend werden Aspekte der Abbildung von Steuerungsalgorithmen diskutiert. Der Artikel endet mit einer Zusammenfassung.

2 Model Checking

Formale Verifikation ist der Nachweis der Korrektheit des Modells eines Systems durch einen Vergleich des Modells mit einer Spezifikation. Diese Methode erfordert eine formale Beschreibung sowohl des Modells als auch der Spezifikation. Auf Basis dieser Voraussetzungen kann ein Model Checker automatisch den kompletten Zustandsraum des Modells untersuchen und die logische Korrektheit der formulierten Spezifikationen gegenüber dem Systemverhalten bestätigen oder sie mit einem Gegenbeispiel widerlegen. Das Gegenbeispiel liefert die Zustandsfolge des Systems, die zum Widerspruch gegenüber der Systemspezifikation geführt hat.

In anderen Fachgebieten findet Model Checking bereits Anwendung. Neben dem Einsatz im Schaltkreisentwurf werden Algorithmen zum Routing in Kommunikationsnetzen damit überprüft (Camara et al. 2007). Die in diesen Arbeiten beschriebenen Ansätze und Modelle sind jedoch nicht auf den Bereich Materialflusssysteme übertragbar. Eine wesentliche Ursache dafür liegt nach Einschätzung der Autoren in der Schwierigkeit und dem hohen Aufwand zur Erstellung der formal verifizierbaren Modelle und bei der Übertragung der verbalen Anforderungen in eine formale Spezifikation. Auch kann diese Methode nur bestimmte, logische Aspekte der Systemanalyse betrachten und den Einsatz der Materialflusssimulation allenfalls ergänzen. Diese Einschätzungen werden auch von Düdder et al. (2008) geteilt, die den Einsatz von Model Checking motivieren.

3 Modellierungsmethode für Materialflusssysteme

Ein Materialflusssystem wirkt als Einheit von Materialflusstechnik und Materialflusssteuerung. Aus der Anordnung und den Verbindungen verschiedener Materialflusstechnik-Komponenten ergibt sich das Layout des Systems. Solche Komponenten sind zum Beispiel Rollenförderer und Drehtische. Ausgehend vom fördertechnischen Grundverhalten der Komponenten erfolgte im ersten Schritt eine Abstraktion wesentlicher Eigenschaften in elementare Verifikationsmodelle mit zustandsorientierter Modellierung (Klotz et al. 2011).

Die für die Steuerung entscheidenden Parameter der Elemente sind:

- Kapazität (Anzahl möglicher Plätze für Transporteinheiten),
- Eingänge (Anzahl möglicher Vorgänger im Layout) und
- Ausgänge (Anzahl möglicher Nachfolger im Layout).

Technische Vorgänge ohne Ortsveränderung der Transporteinheit, z. B. Drehen auf dem Drehtisch, werden durch eine Wartephase abstrahiert. Transporteinheiten werden über ihren definierten Typ unterschieden.

Ein Element hält die Information über die sich auf ihm befindlichen Transporteinheiten und kann diese an andere Elemente übermitteln. Im Entwurf der Verhaltensmodelle wurde sichergestellt, dass die Verbindung der verifizierbaren Elementmodelle zu einem verifizierbaren Gesamtmodell des Systems führt.

Die Modellierung eines Elements schließt steuerungstechnische Bedingungen, die für die elementare Bewegung von Transporteinheiten notwendig sind, bereits ein. In der Steuerung der Bewegung der Transporteinheiten auf den Förderelementen werden zwei Ansätze unterschieden:

1. Die Ankunft einer Transporteinheit auf dem nachfolgenden Element muss von diesem quittiert werden, bevor das abgebende Element eine neue Transporteinheit aufnehmen darf. Dieses Verhalten wird typischerweise in der Palettenfördertechnik umgesetzt.
2. Die Ankunft einer Transporteinheit auf dem nachfolgenden Element muss von diesem nicht quittiert werden. Ein frei werdendes Element kann unmittelbar eine neue Transporteinheit aufnehmen. Dieses Verhalten ist für die Behälterfördertechnik typisch.

Die zustandsorientierte Modellierung für die formale Verifikation erfordert eine Diskretisierung der Werte für Entfernung und Zeit. Modellzustandsänderungen können grundsätzlich nur in diskreten Zeitschritten erfolgen. Im Modellierungsansatz wurden deshalb einige Vereinfachungen gegenüber realen Systemen getroffen.

Der Raum auf allen Förderelementen wird in Plätze gleicher Größe unterteilt, wobei ein Platz genau eine Transporteinheit aufnehmen kann. Alle Transporteinheiten besitzen die gleiche Länge. In der Bewegung wechselt somit eine Transporteinheit in einem Zustandsfolgeschritt komplett von einem Platz auf den benachbarten, sofern dieser verfügbar ist. Der abgebildete minimale Zeitschritt im Modell ist somit identisch mit der Dauer des Platzwechsels einer Transporteinheit. Die Dauer einer Wartephase im Modell beträgt immer ein ganzzahlig Vielfaches eines Zeitschritts.

Eine feinere Auflösung der Bewegung der Transporteinheiten ist innerhalb des Modellierungskonzepts durch eine weitere räumliche Unterteilung der

Förderelemente grundsätzlich möglich. Im Verifikationsmodell würde das allerdings eine Zunahme der Zustandsmenge und damit einen deutlich erhöhten Berechnungsaufwand bedeuten.

3.1 Materialflusstechnik

Für die Modellierung von Materialflusssystemen wurde eine Reihe verschiedener Fördertechnikelemente erstellt, unter anderem die folgenden:

- Quelle: Generierung einer beliebigen Sequenz von Transporteinheiten,
- Senke: Entnahme von Transporteinheiten,
- Stetigförderer: Förderstrecke mit mehreren Plätzen,
- Drehtisch: Förderelement mit mehreren Eingängen Ausgängen, eine Wartephase zur Abbildung der Arbeitsphase (Drehen) des Elements,
- Stauförderer: Förderelement mit mehreren Plätzen, die alle durch Transporteinheiten belegt werden können,
- Arbeitsstation (Bedienstation): Wartephase und Änderung des Typs der Transporteinheit möglich,
- Abweiser: Förderstrecke mit zwei Ausgängen, Push-Vorgang auf den alternativen Nachfolger mit einer Wartephase abgebildet, und
- Einschleuser: Förderstrecke mit zwei Eingängen, Wartephase zur Abbildung der Arbeitsphase (Einschleusen) des Elements konfigurierbar.

Die erstellten Elemente ermöglichen nach Erfahrung der Autoren die Modellierung kompletter Materialflusssysteme. Weitere Elemente können nach Spezifikation ihrer technischen Eigenschaften hinzugefügt werden.

Im vorgestellten Modellierungsansatz wurde von getrennten Verhaltensmodellen der Materialflusstechnik und der Materialflusssteuerung ausgegangen. Dies erlaubt eine flexible Konfiguration der Steuerung.

3.2 Routing im Gepäcktransportsystem

Stellvertretend am Beispiel des Routings in einem Gepäcktransportsystem eines internationalen Flughafens wurde die Fähigkeit des beschriebenen Verifikationsansatzes untersucht, größere Materialflusssysteme abzubilden und bestimmte Eigenschaften der Materialflusssteuerung mit Hilfe einer formalen Verifikation zu prüfen. Eine ausführliche Darstellung des Modellsystems, der Vorgehensweise und der Ergebnisse erfolgt in Klotz et al. (2012).

Neben der Modellierung der Materialflusstechnik mit den vorgestellten Elementen wurden an Verzweigungen und Zusammenführungen lokale Steuerungsentscheidungen hinzugefügt. Die möglichen Gepäcktypen an den Quellen und die erlaubten Gepäcktypen an den Zielen im System wurden spezifiziert. Der Model Checker überprüft die Korrektheit des Routing im Modell durch den automatischen Vergleich der Spezifikation mit allen in der Systemzustandsentwicklung möglichen Gepäcktypen an diesem Punkt.

Die Verifikation zeigte als Ergebnis, dass mit den hinterlegten Steuerungsregeln in allen Unterscheidungsfällen alle Gepäckstücke mit Sicherheit das richtige Ziel erreichen. Zusätzlich wurden alle vorgegebenen Zwischenstationen (z. B. Sicherheit-Screening) absolviert. Unter Anwendung eines kompositorischen Ansatzes (vorgestellt ebenda S. 10 ff.) mit der Zerlegung des Gesamtsystems in

Teilmodelle und deren getrennter Verifikation gelang der Nachweis, dass das Verfahren auch hinsichtlich Rechenzeit für eine praktische Anwendung geeignet ist. Die Durchführung der Verifikation benötigte 210 Sekunden bei 13 Teilnetzen.

Ein Simulationsmodell des Gepäcktransportsystems, erstellt mit dem Simulationsprogramm AutoMod, stand als Ausgangspunkt für Erstellung des Verifikationsmodells zu Verfügung. Das Verifikationsmodell wurde neu aufgebaut und die Steuerungslogik für das Routing manuell ergänzt.

3.3 Materialflusssteuerung

Insbesondere in der Kopplung von Simulation und Verifikation liegen das Anwendungspotential des Model Checkings und der Nutzen für die Simulation.

In Erweiterung der bisherigen Arbeiten der Autoren auf dem Gebiet werden nachfolgend die Wege einer automatisierten Informationsübertragung zwischen den verschiedenen Modellierungsarten diskutiert. Hierbei müssen die Teilbereiche Materialflusstechnik und Materialflusssteuerung getrennt betrachtet werden.

Fördertechnikkomponenten werden im Simulationssystem AutoMod ebenfalls als einzeln parametrierbare Objekte abgebildet, aus deren Verbindungen sich die Struktur des Materialflusssystems ergibt. Der ähnliche Ansatz der Modellierung der Materialflusstechnik ermöglicht die Übertragung zwischen den beiden Modellierungssystemen durch eine einfache Transformation der Beschreibungsparameter.

Die deutliche Verschiedenartigkeit der Modellierungsparadigmen beider Werkzeuge im Bereich der Materialflusssteuerung erfordert, die notwendigen und möglichen Anpassungen in beide Richtungen detaillierter zu untersuchen. Für das Ziel, eine Materialflusssteuerung aus einem Simulationsmodell (z. B. AutoMod) automatisiert in den Werkzeugen eines Model Checkers abzubilden, lassen sich drei Varianten der Transformation aufführen:

1. Anpassung der Implementierung im Simulationsmodell an die Modellierungsparadigmen des Verifikationsmodells

   Steuerungen im Simulationsmodell sind als logische Zustandsgleichungen zu formulieren und die Verwendung spezifischer Sprachkonstruktionen des Simulators zu vermeiden. Beide Anforderungen sind in AutoMod grundsätzlich erfüllbar, verursachen aber Mehraufwand in der Modellierung. Diese Steuerungen können dann zwischen den Modellen übertragen werden.

2. Übertragung von Sprachkonstruktionen des Simulationssystems in die Modellierungswelt des Verifikationsmodells

   Spezifische Sprachkonstruktionen des Simulators sind in Form von logischen Zustandsgleichungen abzubilden. Im Model Checker können dann die Formulierungen aus dem Simulationsmodell unmittelbar nachgebildet werden. Zum einen können aber möglicherweise nicht alle Sprachelemente sinnvoll per Transformation überführt werden. Auch ist die Verwendung beschränkt auf den gewählten Simulator. Diese Variante wird deshalb nicht weiter betrachtet.

3. Entwicklung einer allgemeinen Beschreibungssprache für Steuerungsalgorithmen und einer Transformation für beide Modellierungssysteme

Diese Variante hat den Vorteil, eine Schnittstelle auch für andere Modellierungssysteme zu bieten, erfordert aber den höchsten Entwicklungsaufwand. Die Algorithmen der Materialflusssteuerung als universelle parametrierbare Steuerungsbausteine abzubilden und automatisiert sowohl in ein Simulationsmodell als auch in ein Verifikationsmodell zu übertragen, ist ein Ansatzpunkt für weitere Forschungsarbeit.

Für die Abbildung der Materialflusssteuerung im Verifikationsmodell wurden die Fördertechnikelemente um Steuerungsmodule ergänzt, mit denen Steuerungslogik abgebildet werden kann. Das Steuerungsmodul kann Zustandssignale von Fördertechnikelementen empfangen und Steuersignale ausgeben.

Idee und Vorgehen der Variante 1 wird nachfolgend am Beispiel einer Zusammenführung näher erläutert. Die Steuerung einer Zusammenführung muss eine Entscheidung über die Vorfahrt treffen, wenn an beiden Eingängen Transporteinheiten (TE) warten. Eine häufig angewandte Strategie besteht in der Vorfahrt für die ältere Anforderung (Fifo-Strategie). Anhand dieser Strategie werden die Implementierungen der Steuerungen im Verifikationsmodell und im Simulationsmodell gegenübergestellt. Anschließend wird eine Variante für die Anpassung der Simulation an die Verifikation aufgezeigt.

3.3.1 Verifikationsmodell

Das Steuerungsmodul entscheidet in Auswertung der Zustände an den Ausgängen der Vorgängerelemente und des Belegungszustands der Zusammenführung. Im Algorithmus 1 wird die im Verifikationsmodell implementierte Vorfahrtsstrategie im SMV Code des Model Checkers NuSMV (Cimatti et al. 2002) im wesentlichen Ausschnitt dargestellt. Die verwendeten Variablen besitzen folgende Bedeutung:

- Pre1/2 – Zustandssignal vom Vorgänger 1/2, wenn TRUE, dann wartende TE
- Prio1 – Priorität bei Gleichzeitigkeit, wenn TRUE, dann Vorzug Vorgänger 1
- Sel1/2 – Vorfahrtentscheidung für Vorgänger 1/2
- Psel1/2 – Merker der vorangegangenen Sel1/2 Zuweisung
- Result – Steuerungsergebnis, Rückgabewert an das Fördertechnikelement

Das Modul startet mit einer Initialisierung (*init*) der internen Zustände und ermittelt in jedem Schritt die aktuelle Entscheidung neu, abgelegt in den modulinternen Variablen Sel1 und Sel2. Prio1 löst den logischen Entscheidungskonflikt bei gleichzeitiger Ankunft an Pre1 und Pre2 auf. Die Vorfahrtsentscheidung wird mit *Result* an das Zusammenführungselement übermittelt.

Algorithmus 1: *SMV Code Fifo-Strategie (Ausschnitt)*

```
MODULE merge_control_fifo(Pre1, Pre2)-- control function

ASSIGN     -- init intern variables with Boolean values
init(Psel1):= FALSE;      init(Psel2):= FALSE;
init(Prio1):= TRUE;
next(Psel1):= Sel1;       next(Psel2):= Sel2;

DEFINE
Sel1:=     -- if then else logic
case       -- evaluated in order of occurrence
```

```
  Pre1=TRUE & Pre2=FALSE : TRUE;     --     TE waits at Pre1
                                     & no TE waits at Pre2
  Pre1=TRUE & Psel1=TRUE : TRUE;     --     TE waits at Pre1
                                     & pre-booking for Pre1
  Pre1=TRUE & Psel2=FALSE & Prio1=TRUE : TRUE;
--   TE waits at Pre1 & no pre-booking Pre2, tie-prio for 1
  TRUE : FALSE;      --   all left cases set Sel1 to FALSE
esac;      -- end of case

Sel2:=     -- define Sel2 in Boolean logic
case       -- equivalent to Sel1 logic
  Pre2=TRUE & Pre1=FALSE : TRUE;
  Pre2=TRUE & Psel2=TRUE : TRUE;
  Pre2=TRUE & Psel1=FALSE & Prio1=FALSE : TRUE;
  TRUE : FALSE;
esac;      -- end of case

Result:=   -- defines new Result state
case
  Sel1=FALSE & Sel2=FALSE : 0;
  Sel1=FALSE & Sel2=TRUE  : 2;
  Sel1=TRUE  & Sel2=FALSE : 1;
  Sel1=TRUE  & Sel2=TRUE  : 0; -- should not happen
esac;
```

3.3.2 Simulationsmodell

Nachfolgend wird die Implementierung des vorgestellten Beispiels im Simulationssystem AutoMod mit Standardsprachelementen skizziert. Algorithmus 2 beschreibt eine einfache Steuerung der Transporteinheiten von einer Startstation über Zwischenstationen bis zur Zielstation. Die Einbindung von Zwischenstationen unmittelbar vor und nach einer Zusammenführung (*Merge*) erlaubt den Eingriff der Steuerung in den Transportablauf. Durch die Verwendung des Sprachelements *Counter* kann die Belegung einzelner Plätze (*Station*) gesteuert werden.

Ein *Counter* ist ein Zähler mit parametrierbarer, begrenzter Kapazität. Ein Überschreiten der Kapazitätsgrenze durch den Teilprozess einer Transporteinheit ist nicht möglich. Der Teilprozess wird solange in den Wartezustand versetzt, bis ein anderer Teilprozess den Zählerwert soweit verringert, dass die Erhöhung möglich wird. Die systeminterne Warteliste eines *Counters* ist nach der zeitlichen Reihenfolge der Anforderungsereignisse geordnet.

Für die Fifo-Steuerung der Zusammenführung bietet sich deshalb in AutoMod die Verwendung eines *Counters* mit Kapazität 1 an und wurde so als *counterStation* in Algorithmus 2 implementiert.

Algorithmus 2: *AutoMod Code Transport mit Zusammenführung (Ausschnitt)*

```
begin processTravel arriving procedure
   set CurrentStation to StartStation
   while (CurrentStation <> Destination) do
   begin
     set NextStation to f_GetNextStation(CurrentStation)
```

```
      if  IsMerge(NextStation)    /* wait if merge blocked */
      then increment counterStation(NextStation) by 1
      travel to NextStation       /* get on merge */
      if  IsMerge(CurrentStation) /* release blocked merge */
      then decrement counterStation(CurrentStation) by 1
      set CurrentStation to NextStation
   end
   send to processDestination
end
```

3.3.3 Simulationsmodell modifiziert

Das vorgestellte Implementierungsbeispiel zeigt, dass die Anweisungen zum Transport und zur Steuerung in der Simulation mit AutoMod häufig ineinander verzahnt sind. Diese Form ist effizient in der Simulationserstellung, aber wenig geeignet für eine Übertragung in die Verifikationsmodellierung. Die angestrebte Kopplung von Simulation und Verifikation kann damit nicht realisiert werden.

Eine Lösung besteht in der Anpassung und Erweiterung des ursprünglichen Simulationsmodells. Durch die Separierung und eine zustandsorientierte Modellierung der Steuerungsalgorithmen entsteht ein Simulationsmodell mit gleicher Funktionalität und verbesserter Transformierbarkeit.

Algorithmus 3: *AutoMod Code Zusammenführung modifiziert (Ausschnitt)*

```
begin processTravel arriving procedure
  set CurrentStation to StartStation
  while (CurrentStation <> Destination) do begin
    set NextStation to f_GetNextStation(CurrentStation)
    if  IsMerge(NextStation) then begin
        clone 1 load to processMergeControl –- start control
        wait at orderList(NextStation) -- wait for decision
    end
    travel to NextStation
     if  IsMerge(CurrentStation)
     then clone 1 load to processMergeControl
     set CurrentStation to NextStation
   end
   send to processDestination
end

begin processMergeControl arriving procedure
   set vSelect to f_MergeInSelect(CurrentMerge)
   if  vSelect <> 0
   then continue load(vSelect) from orderList(CurrentMerge)
end

begin f_MergeInSelect function
/*   evaluate merge state equivalent to algorithm 1      */

   set vMControl(CurrentMerge, PSel1)
    to vMControl(CurrentMerge, Sel1)
…
```

```
    if   vMControl(CurrentMerge, Pre1)   = true
    and  vMControl(CurrentMerge, PSel2)  = false
    and  vMControl(CurrentMerge, Prio1)  = true
    then set vMControl(CurrentMerge, Sel1) to true
…
    if   vMControl(CurrentMerge, Sel1) = true
    and  vMControl(CurrentMerge, Sel2) = false
    then set vResult to 1
…
    return vResult
end
```

Algorithmus 3 greift die Implementierung aus Algorithmus 2 auf und schlägt eine neue, erweiterte Formulierung vor. Die Transporteinheiten warten in *WaitList* auf ihre Freigabe. Die Auswahl wird separat in der Funktion *f_MergeInSelect* getroffen. Die Umsetzung der Fifo-Strategie erfolgte in zustandsorientierter Form analog zu Algorithmus 1. Die Implementierung erfolgte AutoMod Code ähnlich und wurde aus Platzgründen nur ausschnittsweise dargestellt. In gleicher Art könnten andere Vorfahrtstrategien im Algorithmus eingesetzt werden, ohne die Struktur der Implementierung zu verändern. Die Realisierung der Steuerungsentscheidung in obiger Form ausschließlich mit zustandsauswertenden logischen Funktionen ermöglicht dann deren automatisierte Übertragung in das Verifikationsmodell.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag präsentiert einen Ansatz zur Verbindung der formalen Verifikation von Materialflusssystemen mit ereignisdiskreter Simulation. Die Prüfung des Systemverhaltens durch Model Checking kann die Analyse von Materialflusssteuerungen durch die ereignisdiskrete Simulation methodisch ergänzen.

Die Kombination beider Methoden bietet das Potential für eine innovative Erweiterung der derzeitigen Ansätze zur Qualitätssicherung von Materialflusssystemen. Eine direkte Kopplung von ereignisdiskreter Simulation und Model Checking bedarf einer verlustfreien Informationsübertragung zwischen den Modellen. Die Herausforderungen hierbei im Bereich der Materialflusssteuerung wurden im Artikel diskutiert und ein spezifischer Lösungsansatz für ein Simulationsprogramm wurde vorgeschlagen.

Die Entwicklung verhaltensdefinierter Steuerungselemente in einer allgemeinen Beschreibungssprache für Steuerungsalgorithmen eröffnet die Möglichkeit einer universellen Systembeschreibung, die als gemeinsamer Ausgangspunkt für verschiedene Modellanalysen dienen kann. Dieser Ansatz soll in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Ein weiterer Aspekt ergänzender Forschung ist der systematische Entwurf von formalen Spezifikationen für die Materialflusssteuerung aus der Analyse der gegebenen Anforderungen an das Materialflusssystem.

Danksagung

Die Arbeit wurde ermöglicht durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter den Förderkennzeichen SCHM 2689/3-1 und STR 412/4-1.

Literatur

Banks, J.; Carson II, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M.: Discrete-event system simulation. 5. Aufl. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education 2010.

Camara, D.; Loureiro, A.; Filali, F.: Methodology for formal verification of routing protocols for ad hoc wireless networks. In: Global Telecommunications Conference, 2007. IEEE, 2007, S. 705-709.

Cimatti, A.; Clarke, E.; Giunchiglia, E.; Giunchiglia, F.; Pistore, M.; Roveri, M.; Sebastiani, R.; Tacchella, A.: NuSMV 2: An OpenSource Tool for Symbolic Model Checking. In: Brinksma, v. E.; Larsen, K. G. (Hrsg.): Computer Aided Verification. Berlin, Heidelberg: Springer 2002, S. 359–364.

Clarke, E. M.; Grumberg, O.; Peled, D. A.: Model checking. Cambridge, Mass., London, MIT Press 1999.

Düdder, B.; Follert, G.; Roidl, M.: Model Checking in multiagentengesteuerten Materialflusssystemen. Technischer Bericht 817. Technische Universität Dortmund, 2008.

Grillitsch, U.; Mayer, G.: Auf dem Weg zum Standard - Virtuelle Inbetriebnahme von IT-Steuerungssystemen in der Produktionssteuerung. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 591-598.

Kemper, J.; Spieckermann, S.: Emulation von Logistik-Steuerungen in SAP-Umgebungen. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 583-590.

Kemper, P.; Tepper, C.: A Petri Net Approach to Verify and Debug Simulation Models. Dagstuhl: Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI), Dagstuhl Seminar Proceedings 06161, 2006.

Klotz, T.; Straube, B.; Fordran, E.; Haufe, J.; Schulze, F.; Turek, K.; Schmidt, T.: An approach to the verification of material handling systems. In: 16th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2011, Toulouse, France, 5. – 9. September 2011, S. 308-315.

Klotz, T.; Seßler, N.; Straube, B.; Fordran, E.; Turek, K.; Schönherr, J.: On the formal verification of routing in material handling systems. In: 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, CASE 2012, Seoul, 20. – 24. August 2012, S. 8-13.

Kropf, T.: Introduction to Formal Hardware Verification. Berlin, Heidelberg: Springer 1999.

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: A new procedure model for verification and validation in production and logistics simulation. In: Mason, S. J.; Hill, R. R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J. W. (Hrsg.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC), Miami (USA), 7.-10. Dezember 2008, S. 1717-1726.

Versteegt, C.; Verbraeck, A.: The extended use of simulation in evaluating real-time control systems of AGVs and automated material handling systems. In: Chen, C.-H.; Yücesan, E.; Snowdon, J. L.; Charnes, J. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (WSC), San Diego (USA), 8.-11. Dezember 2002, S. 1659-1666.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Der Einfluss von Autokorrelation in komplexen Materialflusssystemen

Effect of Autocorrelation on Complex Material Handling Systems

Sebastian Rank, Thorsten Schmidt, Technische Universität Dresden, Dresden (Germany), sebastian.rank@tu-dresden.de, thorsten.schmidt@tu-dresden.de

Tobias Uhlig, Universität der Bundeswehr München, München (Germany), tobias.uhlig@unibw.de

Abstract: This paper investigates the effect of autocorrelated material flows on system behaviour. In contrast to previous research not a simple single server queue model but a complex material flow system modelled in AutoMod® is studied. To gain autocorrelated numbers the ARTA concept is used. An extensive simulation study shows that modelling dependencies needs to be strongly considered in order to gain valid models of complex logistics systems – especially positive correlation should be spent attention. As a result we suggest overhauling state of the art simulation tools to provide inbuilt random number generators for autocorrelated values so practitioners and simulation engineers get an easier access to the topic.

1 Einleitung, Motivation und Stand der Forschung

Zu den Standardwerkzeugen der Planung komplexer Materialflusssysteme zählt die Ablaufsimulation. Eine zentrale Bedeutung hat dabei die Modellierung dynamischer, stochastischer Prozesse. Vorhersagen zum Systemverhalten sind für die korrekte Auslegung realer Anlagen essentiell und durch Simulation überhaupt erst möglich.

Zur Erzeugung von Ereignissen in Simulationsmodellen werden Zufallszahlengeneratoren eingesetzt. Diese ersetzen die oft nicht vorhandenen Realdaten und sollen Prozesscharakteristika nachbilden. In gängiger Software finden hierfür Algorithmen Verwendung, die gezielt unabhängige Ereignisse erzeugen. Eine hohe Unabhängigkeit wird sogar als Gütekriterium angesehen (L'Ecuyer 2006). Bereits einfache Effekte, wie z. B. Losbildung oder das Wirken von Prioritätsregeln bei der Auftragseinlastung, führen jedoch dazu, dass aufeinanderfolgende Ereignisse nicht unabhängig voneinander sind, sondern korrelieren. Dies hat zur Folge, dass bei sonst identischen Annahmen verschiedenes Systemverhalten zu beobachten ist (Rank et al. 2012). Die Erfahrungen der Autoren zeigen auf, dass ein Bewusstsein um die Wirkung korrelierter Ereignisse nur schwach ausgebildet ist. Das hat unmittelbar zur Folge, dass ggf. nicht valide Modelle von Logistik- oder Produktionssystemen zum

Einsatz kommen. Die Konsequenzen für die Auslegung und Steuerung von Anlagen können weitreichend sein und zur Fehlplanung führen.

Aus den bisherigen Ausführungen ergibt sich die Fragestellung, ob in realen Systemen statistisch gesichert Abhängigkeiten zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen beobachtbar sind. Dazu wurde in Rank et al. (2012) eine umfangreiche Studie in Zusammenarbeit mit Unternehmen durchgeführt. Es wurde in 49 von 52 Datensätzen signifikante Korrelationsstrukturen nachgewiesen. Hieraus leitet sich die Frage ab, ob die beobachteten Abhängigkeiten Einfluss auf das Systemverhalten haben, denn theoretische Untersuchungen mit einfachen Einbedienermodellen zeigten, dass mit erheblichen Auswirkungen zu rechnen ist. Dennoch besteht im logistischen Umfeld und speziell auf dem Gebiet der Ablaufsimulation eine geringe Sensibilisierung gegenüber Autokorrelation. Die Verfasser des Beitrages sehen hierfür zwei Gründe. Zum einen herrscht ein mangelndes Problembewusstsein. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass der Einfluss von Korrelationen in realen Systemen vernachlässigbar ist bzw. werden durch Abstraktion Modellungenauigkeiten bewusst in Kauf genommen (siehe auch Hendricks und McClain 1993, Melamed und Hill 1995 oder Nielsen 2007).

Im Folgenden soll diese Hypothese, dass Korrelationen zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen in komplexen Materialflusssystemen keine Auswirkung auf das Systemverhalten haben, widerlegt werden. Dazu wird im Gegensatz zu früheren Untersuchungen Abstand von einem Einbedienermodell genommen und ein realitätsnahes Materialflusssystem analysiert.

1.1 Autokorrelation als Abhängigkeitsmaß

Folgende Ausführungen sind angelehnt an Schlittgen und Streitberg (2001). Danach eignet sich zur Beschreibung der Abhängigkeit zeitlich geordneter Ereignisse, der Autokorrelationkoeffizienten r_τ nach Bravais-Pearson. Dieser soll im Rahmen des Artikels Anwendung finden und ist für Beobachtungspaare $(x_t, x_{t+\tau})$ des Merkmals X für eine Reihe der Länge N mit dem Zeitversatz (auch „Lag“) τ definiert durch:

$$r_\tau = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau}(x_t - \bar{x})(x_{t+\tau} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^{N}(x_t - \bar{x})^2}, \quad \bar{x} = \sum_i \frac{x_i}{N}; \tau = 0, 1, 2, ..., N-1 \qquad (1)$$

Die Darstellung über mehrere Lags erfolgt zur besseren Übersicht oft in sog. Autokorrelogrammen mit gestrichelten Signifikanzlinien (Abb. 1).

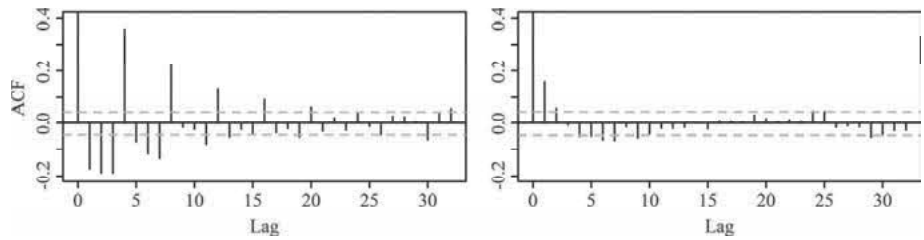


***Abbildung 1:** Beispiele für Korrelogramme; ACF = zu dt. Autokorrelationsfunktion*

Die Koeffizienten r_τ sind auf das Intervall [−1; +1] skaliert und beschreiben die Richtung und Stärke des linearen Zusammenhangs des Merkmals mit sich selbst.

1.2 Autokorrelation in komplexen logistischen Systemen resp. Bedienmodellen

Über den Einfluss von Autokorrelation auf das Systemverhalten von Bedienmodellen wird bereits seit über 50 Jahren geforscht (z. B. Runnenburg 1962). In Einbedienermodellen lassen sich schon bei moderater Parametrierung der Abhängigkeiten erhebliche Abweichungen vom unkorrelierten Referenzmodell beobachten (siehe Rank et al. 2013 und zitierte Quellen darin). Untersuchungen zur Wirkung von Autokorrelation in komplexeren Bediensystemen sind dagegen rar.

Takahashi und Nakamura (1998), Mi et al. (2007) oder Balcioğlu et al. (2008) verknüpfen Einbedienermodelle in verschiedenen Anordnungsvarianten und modellieren Prozesse autokorreliert. Es wird deutlich, dass Abhängigkeiten über Modellelemente hinweg beobachtet werden können. Des Weiteren beeinflusst Autokorrelation die Systemleistung im Vergleich zum unkorrelierten Referenzfall.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Pereira et al. (2012). Im Rahmen einer Fallstudie wird zudem beobachtet, dass bei Berücksichtigung von Autokorrelation das Verhalten von Simulationsmodellen sich denen der untersuchten Realsysteme annähert.

Die dargelegten Quellen zeigen auf, dass sich in einfachen Modellen die Wirkung von Autokorrelation kausal bestimmen lässt. Bei der Kombination mehrerer Bedienelemente zeigt sich ebenfalls, dass das Systemverhalten vom unkorrelierten Fall abweicht. Besonders die Fallstudienergebnisse aus Pereira et al. (2012) lassen vermuten, dass selbst in komplexen Materialflusssystemen keine Nivellierung der an den Systemgrenzen eingebrachten Autokorrelation stattfindet. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Rank et al. (2012), nach denen in 94% aller analysierten Datensätze Abhängigkeiten auftreten, bedarf es einer systematischen Analyse sowie Quantifizierung der Wirkung von Autokorrelation in komplexen logistischen Systemen. Diesem aktuellen Forschungsmangel widmet sich der Beitrag.

1.3 Erzeugung autokorrelierter Zufallszahlen

Im Sinne der Simulation von Materialflusssystemen werden Zufallszahlen in Ermangelung von Realdaten zur Beschreibung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen verwendet. In gängigen Simulatoren oder Softwarepaketen werden in der Regel Algorithmen mit einer linear rekurrenten Bildungsvorschrift eingesetzt. Die erzeugten Zufallszahlen folgen einer identischen Verteilung und sind unabhängig. Zur Erzeugung autokorrelierter Zufallszahlen existieren verschiedene Verfahren (Rank et al. 2012). Im vorliegenden Beitrag wird eine Abwandlung des ARMA-Konzeptes nach Box und Jenkins (1970), der Autoregressive-To-Anything-Ansatz (ARTA) nach Cario und Nelson (1996a), eingesetzt. Ausschlaggebend hierfür sind vor allem die gute Automatisierbarkeit und die Flexibilität. Bause et al. (2009) bestätigen zudem sehr gute Modellierungseigenschaften. Diese Vorteile wiegen die Bedenken bzgl. der Rechenintensität (Nielsen 2007) nach Meinung der Autoren auf. Die Generierung von 20.000 korrelierten Zufallszahlen im vorliegenden Fall dauert mit ARTA unter 1 Sekunde. Die Funktionsweise wird nachfolgend kurz erläutert.

Mit ARTA können autokorrelierte Zufallszahlen mit gegebener Verteilungsfunktion und Autokorrelationsstruktur automatisiert, d. h. ohne Nutzerinteraktion, erzeugt werden. Ein ARTA-Prozess $\{Y_t\}$ mit gewünschter Randverteilung F_Y wird durch Transformation eines AR-Prozesses $\{Z_t\}$ modelliert. Der zugrundeliegende AR-Prozess ist definiert durch:

$$Z_t = \alpha_1 Z_{t-1} + \alpha_2 Z_{t-2} + \ldots + \alpha_p Z_{t-p} + \varepsilon_t, \quad t = 1, 2, \ldots \tag{2}$$

Wobei p den maximal zu beachtenden Lag definiert und $\{\varepsilon_t\}$ eine Reihe unabhängiger Zufallszahlen darstellt. $\{\varepsilon_t\}$ ist normalverteilt $N(0, \sigma^2)$ mit Mittelwert 0 und Varianz σ^2. Die Randverteilung des AR-Prozess $\{Z_t\}$ soll einer Normalverteilung $N(0, 1)$ genügen. Dazu wird die Varianz σ^2 angepasst:

$$\sigma^2 = 1 - \alpha_1 r_1 - \alpha_2 r_2 - \ldots - \alpha_p r_p \tag{3}$$

Dabei gibt r_h den Autokorrelationskoeffizienten zum Lag h für $h = 1, 2, \ldots, p$ an und wird durch $r_h = Corr[Z_t, Z_{t+h}]$ beschrieben. Mit $\{Z_t \sim N(0, 1)\}$ wird sichergestellt, dass die Transformation $U_t = \Phi(Z_t)$ einer uniformen Verteilung $U(0, 1)$ genügt, wobei Φ die Standardnormalverteilung darstellt. Mittels Inversionsverfahren wird U_t in den ARTA-Prozess $\{Y_t\}$ umgewandelt:

$$Y_t = F_Y^{-1}[U_t] = F_Y^{-1}[\Phi(Z_t)] \tag{4}$$

Die Hauptaufgabe besteht in der Bestimmung der Koeffizienten r_h. Diese lassen sich – außer für bestimme Verteilungen – nicht analytisch festlegen. Dafür wird in Cario und Nelson (1996a) ein effizientes nummerisches Suchverfahren mit beliebiger Genauigkeit vorgestellt. Die Bestimmung der Regressionskoeffizienten α_h für $h = 1, 2, \ldots, p$ erfolgt bspw. über ein Yule-Walker-Gleichungssystem (Schlittgen und Streitberg 2001). Eine Softwareimplementierung in FORTRAN des ARTA-Ansatzes wird von Cario und Nelson (1996b) bereitgestellt. Uhlig und Rank (2013) stellen parallel eine JAVA-Bibliothek (sog. „JARTA“) zur Modellierung und Anpassung von ARTA-Prozessen zur freien Verfügung.

2 Experimentaufbau

Als Untersuchungsgegenstand dient ein einem realen betrieblichen Szenario nachempfundenes Simulationsmodell, das in AutoMod® erstellt wurde (Abb. 2). Es soll helfen, die Auswirkung von Autokorrelation in komplexen Modellen zu verstehen und zu quantifizieren. Es nimmt Abstand von bisherigen Untersuchungen, in denen einfache Single-Server-Queue-Modelle im Mittelpunkt standen. Insgesamt sind 18 Materialflüsse definiert (Tab. 1). Bei der Fördertechnik handelt es sich um Stauförderer. Richtungswechsel werden mit Hubtischen vollzogen. Die Bearbeitungszeit der Kommissionierer ist abgeschnitten normalverteilt $N(40, 16^2)$. Die Bestimmung des Regalfaches zur Ein- bzw. Auslagerung erfolgt zufällig gleichverteilt über alle Fächer. Es werden kürzeste Wege gefahren.

Jede Quelle wird durch einen separaten Zufallszahlengenerator mit exponentialverteilten Zufallszahlen (Zwischenankunftszeiten der Aufträge) versorgt. Die Annahme der Exponentialverteilung spiegelt die Erfahrung der Autoren wider (siehe Rank

et al. 2012 sowie auch Law und Kelton 2000 und Arnold 2004). Die Zufallszahlen sind parametrierbar autokorreliert. Zur Generierung wird der ARTA-Ansatz (Abs. 1.3) genutzt. Die „Stärke“ der Autokorrelation variiert zwischen den Quellen und den einzelnen Simulationsstudien (Tab. 2). Als Anhaltspunkt, welche Autokorrelationskoeffizienten realistisch und praxisnah sind, dienen die Betrachtungen in Rank et al. (2012). Simuliert werden mindestens 20.000 Aufträge pro Quelle und 100 Läufe je Parametersatz.

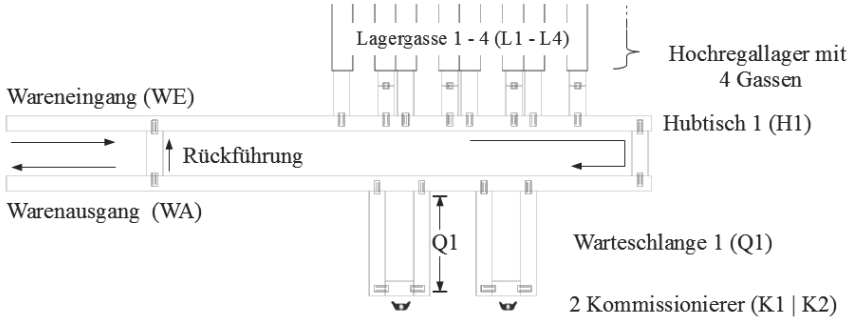


Abbildung 2: *AutoMod® -Simulationsmodell Hochregallager und Kommissionierer*

Tabelle 1: *Definierte Materialflüsse mit Mengenangaben*

Materialfluss	Aufträge pro h	Materialfluss	Aufträge pro h	Materialfluss	Aufträge pro h
WE→L1:	22,50	L1→K1→WA:	11,25	L4→K1→WA:	11,25
WE→L2:	22,50	L1→K2→WA:	11,25	L4→K2→WA:	11,25
WE→L3:	22,50	L2→K1→WA:	11,25	L1→K2→L3:	02,00
WE→L4:	22,50	L2→K2→WA:	11,25	L2→K2→L1:	02,00
WE→K1→WA:	15,00	L3→K1→WA:	11,25	L3→K2→L4:	02,00
WE→K2→WA:	05,00	L3→K2→WA:	11,25	L4→K2→L2:	02,00

Tabelle 2: *Übersicht Experimentbezeichnung und zugehörige Parametrierung der Autokorrelationskoeffizienten zum Lag 1*

Exp.	Autokkoef. Lag 1 r_1 für Quelle					Exp.	Autokkoef. Lag 1 r_1 für Quelle				
	WE	L1	L2	L3	L4		WE	L1	L2	L3	L4
A^-	−0,10	−0,10	−0,10	−0,10	−0,10	A^+	+0,10	+0,10	+0,10	+0,10	+0,10
B^-	−0,25	−0,25	−0,25	−0,25	−0,25	B^+	+0,25	+0,25	+0,25	+0,25	+0,25
C^-	−0,50	−0,50	−0,50	−0,50	−0,50	C^+	+0,50	+0,50	+0,50	+0,50	+0,50
D^-	−0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	D^+	+0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Ref	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						

Um die Performance einfacher Bedienmodellen zu beschreiben, eigenen sich nach Law und Kelton (2000) unter anderem die Wartezeit in einer Warteschlange, die Warteschlangenlänge oder die Auslastung von Bedienelementen. Diese Kennzahlen sind auch in den zitierten Quellen aus Kapitel 1.2 wiederzufinden. Im vorliegenden Fall eignen sie sich nur bedingt. Es soll kein isoliertes Einbedienermodell betrachtet, sondern das Gesamtverhalten eines komplexen Systems beschrieben werden. Dazu wird zum einen in Anlehnung an Fiems et al. (2008) die Kenngröße „Delay" definiert. Diese misst für jeden Auftrag die Verzögerung, d. h. die Aufenthaltszeit im System abzüglich Bedienzeiten und (Netto)Fahrtzeiten. Weiterhin wird die stündliche Leistung von Hubtisch H1 und Kommissionierer K1 (Abb. 2) gemessen. Vom Interesse ist dabei vor allem die Varianz und weniger der Durchsatz der Elemente (dieser ist für alle Initialisierungen aufgrund fest definierter Materialflüsse gleich – s. Tab. 1). Um die Variabilität der Leistungskennzahlen des Systems zu messen, werden im Mittel alle zwei Sekunden (exponentialverteilt) die sich im Gesamtsystem und in Warteschlange Q1 befindlichen Loads gezählt. Der Hintergrund der Varianzanalyse ist folgender: falls Autokorrelation die Varianz beeinflusst, hätte dies direkte Auswirkung auf Warteschlangelängen bzw. die Auslegung von z. B. Warteräumen (Law und Kelton 2000).

3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Simulationsstudie präsentiert und bewertet. In Abbildung 3 werden die Delays untersucht. Für die jeweils 100 Initialisierungen wird die mittlere Verzögerung gebildet und in einem Boxplot dargestellt.

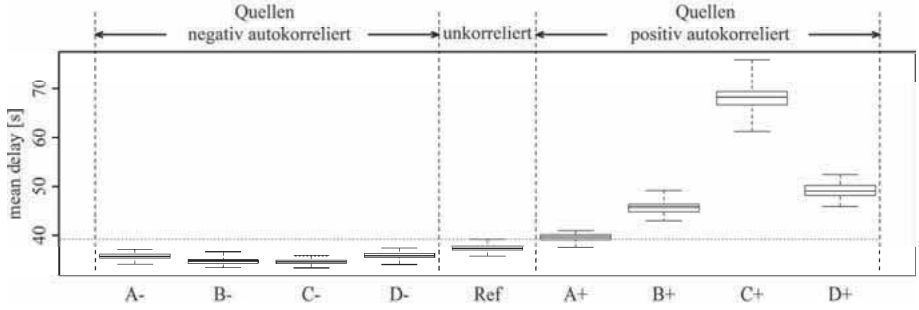


Abbildung 3: *Verteilung des mittleren Delays; Ref (unkorreliert) horiz. gestrichelt*

Aus Abbildung 3 wird deutlich, dass – sobald das Modell mit autokorrelierten Zwischenankunftszeiten gespeist wird – sich das Systemverhalten im Vergleich zum unkorrelierten Fall verändert. Bei negativen Autokorrelationskoeffizienten verringert sich der Delay (A^-, B^- und C^-), bei positiven Koeffizienten ist, deutlich stärker ausgeprägt, ein gegenteiliger Effekt zu beobachten (A^+, B^+ und C^+). In abgeschwächter Form trifft dies auch zu, wenn nur eine Quelle des Systems autokorrelierte Zwischenankunftszeiten aufweist (D^-und D^+). Im Extremfall verweilen Aufträge ca. 45% länger im System, wenn positive Abhängigkeiten auftreten und ca. 7% kürzer bei negativen Abhängigkeiten.

In Abbildung 4 wird der Durchsatz am Hubtisch H1 dargestellt. Außerdem ist eine Zeitreihe der Aufträge im System abgebildet. Es werden aus den ca. 1800 stündlichen Werten (Kap. 2) der Minimal-, Maximal- und Mittelwert abgetragen. Herangezogen werden die Ergebnisse eines repräsentativen Simulationslaufes für die Experimente C^+, C^- und des unkorrelierten Referenzmodells (siehe auch Tab. 3). Erwartungsgemäß verzeichnet der Hubtisch H1 bei den drei exemplarischen Experimenten gleiche mittlere Durchsätze (waagerechte Linie). Stündlich aufgelöst wird aber ersichtlich, dass die Schwankungsbreite sich erheblich unterscheidet (C^-: [100; 147], C^+: [75; 183], Ref: [91; 151]). Identische Ergebnisse zeigen sich für die Zahl der im System befindlichen Aufträge. Eine höhere Varianz führt dazu, dass die Warteschlangenlänge vor Kommissionierer K1 öfter die maximale Länge von sieben erreicht (Abb. 5). Im konkreten Fall ist der Warteraum bei Experiment C^+ etwa zweieinhalbmal häufiger voll im Vergleich zu C^- und Ref.

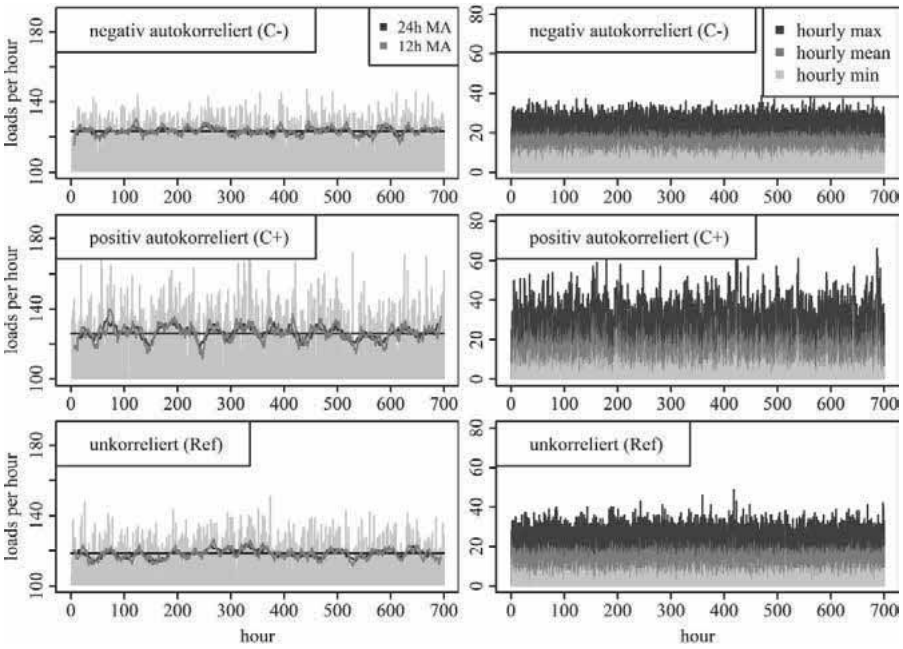


Abbildung 4: *Links: stündlicher Durchsatz am Hubtisch H1 (MA = gleitender Durchschnitt); Rechts: im Gesamtsystem befindliche Aufträge stündlich aufgelöst; hellgrau: minimale Anzahl, dunkelgrau: mittlere Anzahl, schwarz: maximale Anzahl*

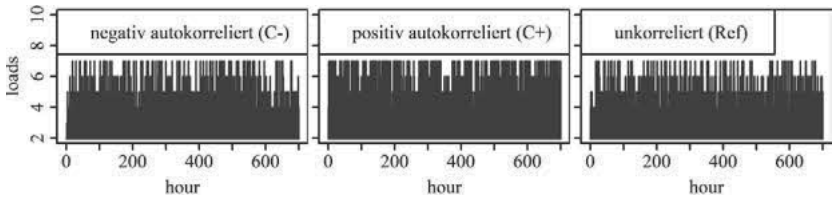


Abbildung 5: *stündliche maximale Warteschlangenlänge vor Kommissionierer K1*

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zusammen. Zusätzlich ist der Durchsatz des Kommissionierers K1 angegeben. Im Kern sind folgende Erkenntnisse hervorzuheben. Autokorrelierte Zwischenankunftszeiten beeinflussen das Systemverhalten deutlich. Positive Korrelation erhöht die Wartezeit, Varianz des Systems und Häufigkeit eines vollen Warteraums. Bei negativer Autokorrelation ist ein Minimum an Wartezeit und Varianz zu verzeichnen. Die teils leicht unterschiedlichen Durchsätze resultieren aus der Modellierung der Zufallszahlen (Cario und Nelson 1996a).

Tabelle 3: *Ergebnisse aus Simulationsstudie; Prozentangaben relativ zu Ref; Per. = Perzentil; μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung*

Exp	alle Initialisierungen			repräsentative Initialisierung			
	mittlerer Delay [s]			Durchsatz	Durchsatz	Aufträge	Häufigkeit
	25-Per.	50-Per.	75-Per.	Hubtisch H1 [$\mu \pm \sigma$]	Kommis. K1 [$\mu \pm \sigma$]	im System [$\mu \pm \sigma$]	Warteraum Q1 voll
Ref	*36,9*	*37,3*	*37,8*	*118 ± 10,5*	*58 ± 07,6*	*18 ± 01,9*	*77*
A^+	+06%	+06%	+06%	118 ± 11,6	58 ± 07,9	19 ± 02,1	+018%
A^-	−04%	−04%	−05%	119 ± 10,2	58 ± 07,2	19 ± 01,9	+002%
B^+	+18%	+18%	+19%	119 ± 13,2	60 ± 08,4	20 ± 02,7	+045%
B^-	−07%	−07%	−08%	120 ± 09,4	59 ± 07,1	19 ± 01,7	−002%
C^+	+45%	+45%	+46%	127 ± 16,1	62 ± 10,3	22 ± 04,7	+252%
C^-	−07%	−08%	−08%	123 ± 08,8	60 ± 06,7	19 ± 01,5	+002%
D^+	+23%	+24%	+25%	119 ± 11,5	58 ± 07,7	20 ± 02,8	+045%
D^-	−04%	−04%	−04%	118 ± 10,5	58 ± 07,5	19 ± 01,9	+003%

4 Diskussion

Die Ergebnisse aus Kapitel 3 machen deutlich, dass durch Autokorrelation das Systemverhalten komplexer logistischer Systeme merkbar beeinflusst wird. Erkenntnisse früherer Untersuchungen werden dabei in der Tendenz bestätigt: positiv autokorrelierte Materialflussströme erhöhen die Wartezeiten, Varianz und Warteschlangelängen. Die Hypothese, dass Abhängigkeiten realitätsnahe Materialflusssysteme nicht beeinflussen, sollte demnach verworfen werden. Wie bereits von Nielsen (2007) vergleichend zu Einbedienermodelle vermutet, sind keine tausend Prozent Abweichung zu erwarten. Dennoch geben die Erkenntnisse Anlass, die übliche Modellannahme der Unabhängigkeit von Ereignissen bzw. die etwaige Inkaufnahme von Modellungenauigkeiten zu hinterfragen. Wird bspw. die Wartezeit bzw. in Konsequenz die Durchlaufzeit von Aufträgen im System falsch eingeschätzt, hat das direkte Auswirkung auf Aussagen zu Reaktionszeiten. Werden in der Simulation zeitkritische Abläufe beurteilt, ist somit unbedingt auf positive Autokorrelation zu achten, da ansonsten die Systemleistung deutlich überschätzt wird.

Die dargelegte Auswirkung abhängiger Ereignisse auf die Varianz und im Ergebnis auf Warteschlangen hat in Praxis ebenfalls große Bedeutung. Bei stark positiv auto-

korrelierten Materialflüssen sind auch in komplexen logistischen Systemen größere Puffer zu planen, um im Vergleich identische Leistungskennwerte zu erreichen. Andernfalls ist, wie im vorliegenden Modell, davon auszugehen, dass nicht ausreichend dimensionierte Warteräume Staus in vorgelagerten Bereichen verursachen. Insbesondere da bei den durchgeführten Experimenten beobachtet wurde, dass mit zunehmender Autokorrelation die Häufigkeit für Systemblockaden rapide steigt.

Im Sinne einer validen Modellierung ist eine bewusste Nichtbeachtung von Abhängigkeiten kaum zu vertreten. Um demnach Fehlplanungen zu vermeiden und die Lücke zwischen Modell und Realität zu verringern, sollten Simulationswerkzeuge Generatoren bereitstellen, die passende Zufallszahlen generieren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Artikel wird das Wirken von Autokorrelation in komplexen Materialflusssystemen untersucht. Zum Nachweis der Auswirkungen wird eine umfangreiche Simulationsstudie durchgeführt und u. a. mit den Wartezeiten von Aufträgen, Durchsätzen und Warteschlangenlängen bewertet. Zur Generierung autokorrelierter Zufallszahlen wird der ARTA-Ansatz eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass Argumentationen gegen die Beachtung von Autokorrelation nicht haltbar sind. Positive Autokorrelation verschlechtert die Systemperformance, negative verbessert sie leicht.

Um die Ergebnisse zu verdichten ist weitere Forschung von Nöten. Dazu muss die Abstufung der Abhängigkeitsstrukturen verfeinert und eine Variation in den Materialflüssen erfolgen. Ferner sollten die Auswirkungen autokorrelierter Ausfall- oder Bedienzeiten betrachtet werden. Zentrales Anliegen ist die Etablierung des Einflussfaktors Autokorrelation in der Simulation. Eine analytische Betrachtung steht ebenfalls aus.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben (17344 BR) der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik (BVL) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

Arnold, D.: Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2004.

Balcioğlu, B.; Jagerman, D.L.; Altiok, T.: Merging and splitting autocorrelated arrival processes and impact on queueing performance. In: Performance Evaluation 65 (2008) 9, S. 653–669.

Box, G.E.P.; Jenkins, G.M.: Time series analysis. San Francisco: Holden-Day 1970.

Bause, F. et al.: A comparison of Markovian arrival and ARMA/ARTA Processes for the modeling of correlated input processes. In: Rossetti, M.D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), Austin, 13.–16. Dez. 2009, S. 634–645.

Cario, M.C.; Nelson, B.L.: Autoregressive to anything: Time-series input processes for simulation. Operations Research Letters 19 (1996a) 2, S. 51–58.

Cario, M.C.; Nelson, B.L.: ARTA Code Source. (1996b), URL: http://users.iems.northwestern.edu/~nelsonb/ARTA/ – Abgerufen: 2013-04-10.

Fiems, D.; Claeys, D.; Bruneel, H.: Performance Analysis of Discrete-Time Autoregressive Queueing Systems. In: Workshop proceedings of the IEEE International Conference on Communications, 19.–23. Mai Beijing, 2008, S. 232–235.

Hendricks, K.B.; McClain, J.O.: The Output Process of Serial Production Lines of General Machines with Finite Buffers. Management Science 39 (1993) 10, S. 1194–1201.

L'Ecuyer, P.: Uniform Random Number Generation. In: Henderson, S.G.; Nelson, B.L. (Hrsg.): Elsevier Handbooks in Operations Research and Management Science: Simulation. Amsterdam: Elsevier Science 2006, S. 55–81.

Law, A.M.; Kelton, D.W.: Simulation Modeling and Analysis. Singapore: Mcgraw-Hill Professional 2000.

Melamed, B.; Hill, J.R.: A Survey of TES Modeling Applications. SIMULATION 64 (1995) 6, S. 353–370.

Mi, N. et al.: Performance impacts of autocorrelated flows in multi-tiered systems. Performance Evaluation 64 (2007) 9–12, S. 1082–1101.

Nielsen, H.E.: Autocorrelation in queuing network-type production systems. International Journal of Production Economics 110 (2007) 1–2, S. 138–146.

Pereira, D. et al.: Autocorrelation effects in manufacturing systems performance: a simulation analysis. In: Laroque, C. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC), Berlin, 9.–12. Dez. 2012, S. 123:1–123:12.

Rank, S.; Uhlig, T.; Schmidt, T.; Rose, O.: Beherrschung stark korrelierter Logistik- und Produktions-Prozesse. In: Zadek, H. (Hrsg.): Tagungsband zum 8. Fachkolloquium der WGTL e. V., Magdeburg, 26./27. Sept. 2012, S. 135–146.

Runnenburg, J.T.: Some numerical results on waiting-time distributions for dependent arrival-intervals. Statistica Neerlandica 16 (1962) 4, S. 337–347.

Schlittgen, R.; Streitberg, B.H.J.: Zeitreihenanalyse. 9., unwesentlich veränderte Auflage. München, Wien: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2001.

Takahashi, K.; Nakamura, N.: The effect of autocorrelated demand in JIT production systems. Int. Journal of Production Research 36 (1998) 5, S. 1159–1176.

Uhlig, T.; Rank, S.: A Java library to model and fit ARTA processes. (2013), URL: http://sourceforge.net/projects/jarta/ – Abgerufen: 2013-05-20.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulative Algorithm Analysis in Online Optimization with Lookahead

Simulative Algorithmenanalyse für Online-Optimierungsprobleme mit Lookahead

Fabian Dunke, Stefan Nickel, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe (Germany), fabian.dunke@kit.edu, stefan.nickel@kit.edu

Abstract: In online optimization, input data is revealed sequentially. Optimization problems from practice exhibit this type of information disclosure as opposed to standard offline optimization where all data is known in advance. We present a general method to analyse the impact of lookahead on the solution quality obtained by algorithms in applications of online optimization with lookahead. To this end, we first propose a generic framework to harmonize concepts and notation throughout domains. In addition, we tailor performance measurement approaches to the needs of online algorithms under various lookahead levels. In complex settings, the method is best applied within a sample-based simulation scheme to judge on algorithm quality and to determine the value of additional information. Finally, we instantiate the framework for three applications and conduct numerical experiments. Results indicate that algorithm behaviour depends on the amount of lookahead, but also that the lookahead value strongly relies on the problem itself.

1 Introduction

Due to technological advances, the number of problem settings where input data is obtained and processed in real-time is continuously increasing. Examples include storage and retrieval, order picking, machine scheduling, or distribution planning (Jaillet and Wagner 2006; Albers 2003). Since these systems are subject to steady information disclosure, they are said to be online. Optimization problems arising in these contexts are called online optimization problems and algorithms for them have to operate dynamically. This paradigm is completely opposite to that of classical (offline) optimization where all input data is assumed to be known in advance. In between these two extremes, there is an intermediate setting which we will call online optimization with lookahead. Here, the amount of accessible information is governed by a lookahead mechanism, e.g., preponing bar code scanners or sending order information at an earlier time.

The function logic in operating and controlling dynamic systems repeatedly requires decision making in order to continue. For each of these decisions, an online algorithm is called as a subroutine. It has to determine partial solutions based on the currently available input data such that the overall solution which will be composed of all partial solutions will be as good as possible. Figure 1 sums up the hierarchical relation between the logics in a dynamic system and the online optimization module needed therein (März and Krug 2011; Lavrov and Nickel 2005).

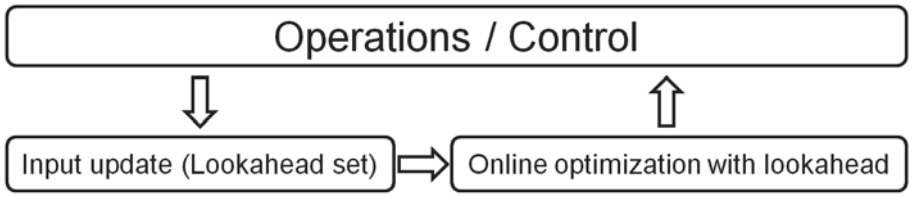


Figure 1: *Hierarchical relation between the function logic of operating / controlling a dynamic system and the module of online optimization with lookahead*

Clearly, an exact analysis of dynamic systems requiring repeated decision making is possible only for easy and small problem settings. For more complex settings, we use simulation as a method to duplicate the function logic of the real-world system in an abstract way (Cassandras and Lafortune 2008; VDI 1993).

Both in designing and operating a dynamic system, preferably a best possible algorithm for each decision needs to be identified within a set of viable algorithm candidates. As the system evolves over time and decisions are based on the currently available amount of information, we also ask for an algorithm's sensitivity to information with respect to the outcome. The following two central questions will serve as a guideline subsequently:

- Which one of the algorithm candidates for a given problem is most suitable?
- How is an algorithm's performance affected by the amount of lookahead?

In order to answer these questions on a simulative basis, we may run a sufficiently large number of independent simulations replications to obtain empirical results. We call this type of analysis simulative algorithm analysis.

2 A Framework for Online Optimization with Lookahead

We consider how a given system whose function logic iteratively requires solving an online optimization problem can be tackled formally and domain-independent. To this end, let the input of an optimization problem be given in form of an input sequence $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, ..., \sigma_n)$. The elements of σ are called input elements, and the set of unprocessed known input elements at time t is called the lookahead set at time t.

2.1 Lookahead Types and Processing Characteristics

Which elements of σ are known exactly to an algorithm depends on the lookahead type; which elements of σ are eligible to be processed next depends on the

processing characteristics. Lookahead type and processing characteristics are intertwined by the (physical) restrictions imposed by the dynamic system.

2.1.1 Lookahead Types

Numerous lookahead concepts have been introduced with reference to a specific problem setting (Allulli et al. 2008; Jaillet and Wagner 2006; Albers 1997; Breslauer 1996). The following two definitions seem intuitive and are not specific to a problem. They cover a multitude of the concepts proposed in literature.

- In request lookahead, at each point in time a fixed number K of future input elements is seen. Examples can be found in paging systems of computer programs, in material provision in production lines or in pallet embarkation.
- In time lookahead, at each point in time t the algorithm knows those input elements which would have been known by time $t + D$ if there was no lookahead. D is called lookahead duration. Examples for this type of lookahead can be found in vehicle routing, in pick list generation of order picking systems and in dynamic passenger information boards.

The classification into request lookahead and time lookahead is not exhaustive, but these two types represent the most important prototypes for the definition of further lookahead types, e.g., time lookahead with maximum number of input elements.

2.1.2 Processing Characteristics

Besides the mode of information disclosure itself, we have to take into account the implications of the input release mechanism on the processing of the input elements.

Processing order:

- In random access processing order, all known input elements from the lookahead set are eligible to be processed in arbitrary order. An algorithm does not only profit from the preponed release of an input element but also from the right to permute their processing order as compared to the case without lookahead.
- In sequential processing order, all known input elements from the lookahead set have to be processed in their order of release. An algorithm only profits from information being available earlier, but processing order changes are forbidden.

Processing availability:

- In immediate processing availability, an input element is ready to be (physically) processed directly upon receiving the respective input element information.
- In regular processing availability, it has to be waited until the regular earliest processing time of the pure online setting has been reached before processing of the input element is started.
- In intermediate processing availability, processing an input element is possible at some time between its notification and its regular earliest processing time.

Note that the processing characteristics determine some of the constraints under which an online algorithm with lookahead has to operate. Hence, their influence on the outcome of an algorithm for a given problem instance can be enormous.

2.2 Process Model of Online Optimization with Lookahead

Interpreting the arrival of a new input element σ_i as an event, we describe the system as a discrete event system, and take into account that state transitions are also

triggered by decisions of an online optimization algorithm immediately following the notification of a new input element.

2.2.1 Modelling Elements

We embed the system into a time component and denote current time by t. Each input element has a (reference) release time in absence of lookahead, and in presence of lookahead this release time is preponed as governed by a lookahead device. The process model comprises the following elements:

- The input sequence $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, ...)$ holds the successively arriving input elements.
- The lookahead set L_t contains all input elements that have been released up to time t which are yet unprocessed or still in processing.
- The state space S comprises the set of configurations that can be reached by the system including the current lookahead set. Note that the state may change continuously. In order to inspect the system only at discrete points in time, we introduce objective states.
- The objective state space O extracts all information regarding the development of the objective value. We assume that the objective state can only change as a result of finished processing of an input element at discrete time instants.
- The action space A is the union of the set of all actions which can be performed on an input element with the null-action which is assigned to an input element as long as no action has been determined for it. An action describes the processing that an input element is about to experience.
- The objective state transition function f: $S \times O \rightarrow O$ determines the successor objective state of a given current objective state $o \in O$ which results by finished processing of an input element's action.
- An algorithm ALG is a goal-oriented sequence of computations to determine the (intended) action for each input element in the lookahead set.

2.2.2 Process Model

The process model for online optimization problems with lookahead describes the temporal interaction of the modeling elements. The evolution of the system state and objective state trajectory is driven by input element releases and by performing actions on the input elements as determined by algorithm ALG. The process model implements the function logic of a dynamic system by iteratively performing the steps in the flow chart of Figure 2:

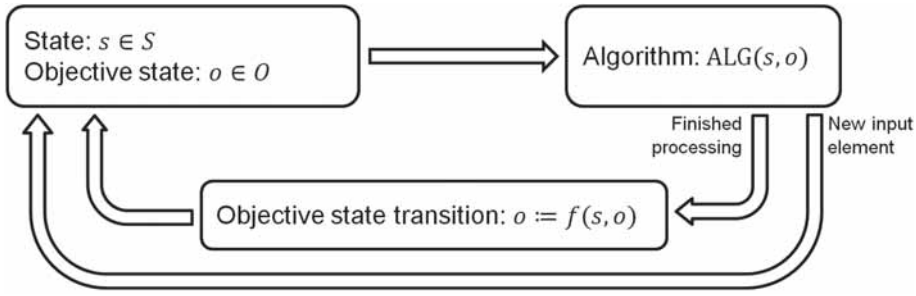


Figure 2: *Process model for online optimization with lookahead*

2.3 Framework for Online Optimization with Lookahead

The generic framework for online optimization with lookahead comprises the combination of lookahead type, implied processing characteristics and process model. Its instantiations give a clear description of the constraints and the potential workflow that the system under consideration undergoes while processing an arbitrary input sequence using an algorithm with lookahead capabilities.

The framework harmonizes the representations of the solution process in online optimization problems with lookahead and unifies notation throughout application domains. It facilitates systematic algorithm analyses in arbitrary applications using the same paradigms concerning the solution process and the lookahead mechanisms.

Using a generic implementation of the process model and concrete instantiations of lookahead type, processing characteristics and algorithms, we analyzed the lookahead effect for algorithms in paging, bin packing, scheduling and routing problems (cf. also section 4).

3 Algorithm Analysis in Online Optimization with Lookahead

Due to the unknown future, no algorithm can solve an online optimization problem to optimality on any instance. Hence, in order to compare the quality of algorithms, we have to agree upon a performance measurement method which is capable of conveying the algorithms' qualities and assessing the value of additional lookahead. Moreover, we wish to apply the method within a simulation environment.

3.1 Survey of Performance Measures in Online Optimization

The standard performance measure in online optimization is the competitive ratio (Borodin and El-Yaniv 2005; Woeginger and Fiat 1998). An online algorithm in a minimization problem is c-competitive if for all σ it holds that $\mathrm{ALG}(\sigma) \leq c \cdot \mathrm{OPT}(\sigma)$ where $\mathrm{OPT}(\sigma)$ is the minimal cost of an optimal offline algorithm for processing σ.

The competitive ratio yields a worst case analysis where a pathological input sequence may decide upon its value. In many cases, this type of analysis leads to overly pessimistic results (Hiller and Vredeveld 2012; Boyar et al. 2009) and it does not give a clue at an algorithm's average and overall performance since it only rates an algorithm based on a single number. In practice, choosing this performance measure can lead to rude surprises concerning the behaviour of an algorithm on typical input instances, and bad algorithms may be favoured. Also, this type of analysis is impossible in slightly more complex systems (Woeginger and Fiat 1998).

There are no special approaches for the case with lookahead. Existing research is concentrating on how the competitive ratio improves as a result of lookahead – if that (Allulli et al. 2008; Jaillet and Wagner 2006; Albers 1997; Breslauer 1996).

3.2 Holistic Performance Measurement

We present two distributional methods which – taken together – are well-suited for comprehensively analysing the performance of online algorithms under lookahead within a simulation environment. We subsume all candidate algorithms underlying the same lookahead mechanism in one algorithm set.

3.2.1 Distribution of Performance Ratio for Algorithm Sets

Let A and B be sets of algorithms, let σ be an input sequence and let ALG(σ) denote the objective value of algorithm ALG on input sequence σ, then the ratio

$$c_{\sigma}^{B/A} := \frac{\min\limits_{\text{ALG}'\in B} \text{ALG}'(\sigma)}{\min\limits_{\text{ALG}\in A} \text{ALG}(\sigma)} \tag{1}$$

is called performance ratio of B relative to A with respect to σ.

We can identify A as a set of algorithms without lookahead and B as a set of algorithms with lookahead. For a sufficiently large number of input sequences, we can derive the (empirical) performance ratio distribution to get an impression over a broad spectrum of instances (Fig. 3a)). The performance ratio is a local measure in the sense that it compares algorithm sets directly on the same input sequence.

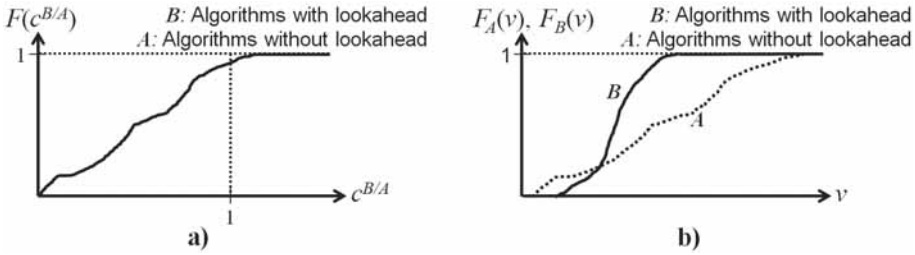


Figure 3: *Distribution functions F(·) of a) performance ratio and b) objective value*

3.2.2 Distribution of Objective Value for Algorithm Sets

Let A be a set of algorithms and let σ be an input sequence, then the value

$$v_{\sigma}^{A} := \min_{\text{ALG}\in A} \text{ALG}(\sigma) \tag{2}$$

is called the objective value of algorithm set A with respect to σ. For a sufficiently large number of input sequences, we can derive (empirical) distributions of the objective value to get an impression over a broad spectrum of instances (Fig. 3 b)). The objective value distribution is a global performance measure for algorithm set A and algorithm set B, respectively, in the sense that it portrays the individual behaviour of A and B over the input sequences. A comparison between two algorithm sets is made indirectly by comparing the shape and position of the plots.

4 Numerical Results

We instantiated the generic framework in three applications to perform numerical experiments using the performance measures from above. In the subsequent simulative algorithm analyses, we focus on finding an appropriate lookahead level. Simulation

models were implemented in *C++* (first / third application) and *AnyLogic 6* (second application), integer programming (IP) problems were solved by *CPLEX 12.4*.

4.1 Online Traveling Salesman

The traveling salesman problem (TSP) is the core of numerous transportation and routing problems. It is defined by *n* points in a metric space that have to be visited by a server tour such that the tour length is as small as possible. Both request and time lookahead can be applied.

Algorithms: We investigate algorithms under request lookahead of size *K*.

- NEAREST NEIGHBOR: The closest point in the lookahead set is visited next.
- INSERTION: The next point visited by the server is the first point of a Hamilton path which is formed by successive best insertion of the points in the lookahead.
- 2-OPT / 3-OPT: The next point visited by the server is the first point of a Hamilton path which is formed by successively improving an initial tour through exchanges of edge pairs (2-OPT) and edge triples (3-OPT), respectively.
- SIMULATED ANNEALING: Identical to 2-OPT except that temporarily worse tours are allowed to move from local to global optima of the snapshot problem.
- IP SOLVE: The next point visited by the server is the first point of a Hamilton path which is determined by solving an IP formulation of the snapshot problem.

Average results: For 25 and 100 points, we ran 100 simulation replications for each algorithm and lookahead. The average tour length for different lookahead sizes demonstrates the huge benefit accrued by lookahead (Fig. 4). For K=5 and 100 points, tour length reduces to 50% as compared to the online setting, and for K = 100 to 12%. Surprisingly, all algorithms experience positive effects in a comparable amount. The easy NEAREST NEIGHBOR algorithm induces stability in the sense that it guarantees no jumps between regions. For algorithms working towards local optimality such as IP SOLVE these jumps may occur and prove globally inefficient.

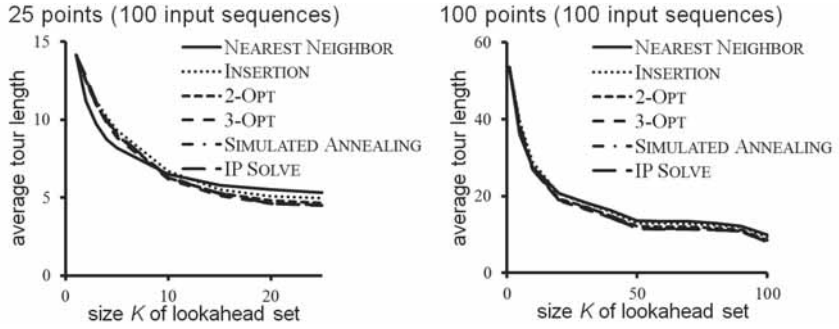


Figure 4: *Average tour length with 25 points and 100 points*

Distributional results: Figure 5 shows the distribution of the performance ratio and objective value for algorithm sets with selected lookahead regimes for 100 points relative to pure online algorithms. The plots show the expected ordering (dominance) of the distributions according to the lookahead level. All plots are very

steep in a characteristic area of the abscissa which accounts for a typical tour length reduction of a lookahead level.

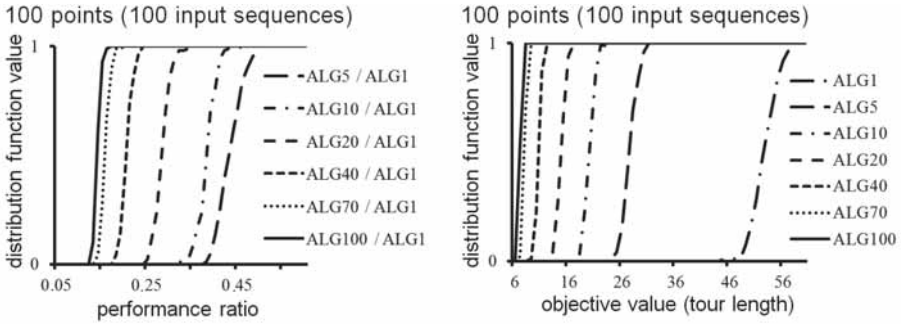


Figure 5: *Distribution functions of performance ratio and tour length*

4.2 Online Pickup and Delivery

A simulation model has been put up for a pickup and delivery service with a fleet of N vehicles in Karlsruhe. It covers stochastic request generation with time windows, alternative route selection, stochastic congestion information, loading and unloading times. A number of objectives (distance, lateness, load and driving time violations) were evaluated under time lookahead. We discuss only total distance.

Algorithms: We investigate algorithms under time lookahead of length D.

- RULE-BASED HEURISTIC: Routes are determined in four steps: Assignment of orders to vehicles based on simple criteria, resequencing of routes, reassignment of critical requests, and resequencing of routes.
- 2-OPT: The routes obtained by RULE-BASED HEURISTIC are improved using exchanges of edge pairs which lead to better feasible tours.
- SIMULATED ANNEALING: Identical to 2-OPT except that temporarily worse tours are allowed to move from local to global optima of the snapshot problem.
- TABU SEARCH: Routes obtained by RULE-BASED HEURISTIC are improved by moving to the best non-tabu route plan in the neighborhood of the current plan. A neighbor of a route plan is obtained by reassigning one request to another vehicle. The current route plan is tabu for a given number of iterations.
- IP SOLVE: Each vehicle follows a route which is determined by solving the IP formulation of the snapshot problem with all unserved requests.

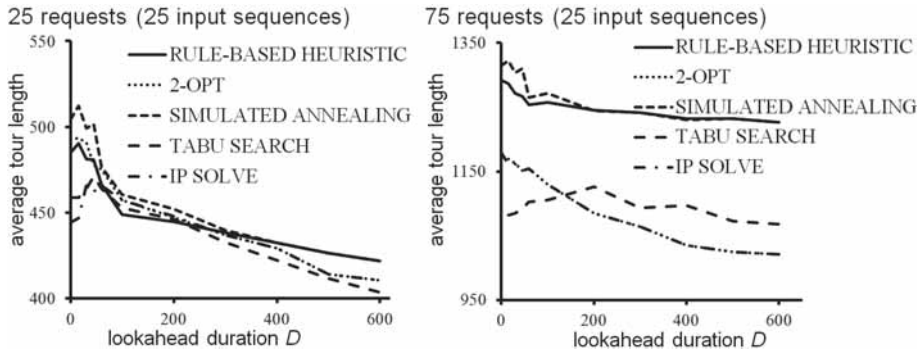


Figure 6: *Average tour length with 25 requests and 75 requests*

Average results: For $N = 3$ vehicles, we considered 25, 50, 75 and 100 requests per day, and lookahead between 15 and 600 minutes. For each combination, 25 simulation replications were run. Figure 6 displays that lookahead is beneficial for all algorithms albeit not as drastically as in the TSP. TABU SEARCH and IP SOLVE lead to the best routes. Small lookahead does not lead to reliable improvements as requests may pop up shortly before their pickup time window starts.

Distributional results: In Figure 7, the positions of the distribution functions confirm that lookahead is *reliably* helpful only for D large enough. Performance ratios larger than 1 indicate that an algorithm may fail to interpret lookahead to its advantage. Yet, the proportion of these instances is small. Distributions are not ordered perfectly.

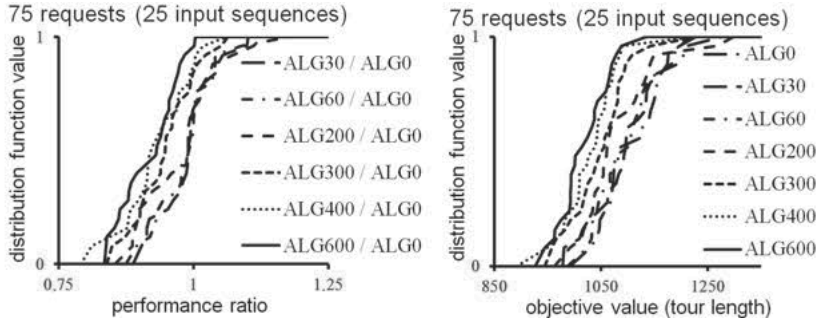


Figure 7: *Distribution functions of performance ratio and tour length*

4.3 Online Bin Packing

We adapt well-known online and offline algorithms (Borodin and El-Yaniv 2005) to request lookahead of size K, and also employ an exact IP approach.

Lookahead leads to fewer bins for all algorithms. However, the savings is comparatively small such that between the extreme cases of the online and offline situation only a reduction of at most 5% can be realized. Computing time intensive IP SOLVE is advantageous only when K is large enough, and there is no evidence that locally optimal solutions carry over to the global solution after all items have been packed. Hence, simple heuristics like BEST FIT or FIRST FIT are sufficient.

In the case of 1000 items, for $K \geq 500$ the distributions coincide and there is no additional value. For $K < 500$ there is an order (dominance) of the distributions confirming the (small) lookahead effect. Distributions have negligible variance.

4.4 General Conclusion

In contrast to bin packing, a strong lookahead effect is observed in the TSP, and a fair one in the pickup and delivery service. The core reason for the differences is that changing the visiting order of the points in a TSP immediately affects the total travel distance; in contrast, an item in bin packing occupies the same capacity regardless of the packing order. Moreover, we find that an algorithm's degrees of freedom as imposed by the restrictions play an important role in its ability to take advantage of lookahead. Hence, the results demonstrate that information sensitivity is strongly related to the problem itself and cannot be presupposed in general.

5 Summary and Outlook

In order to derive well-informed statements about the quality of algorithm candidates and the value of information, we presented a holistic method of algorithm analysis in online optimization with lookahead based on a common understanding of the implications of lookahead as manifested in the generic framework. The main advantage over existing methods is that an algorithm is no more compared to an almighty offline optimum but to a comparable information regime. However, the approach is mainly suitable only for empirical (approximate) analyses. Due to problem complexities exact analyses are impossible for more complex problems. The method could be further improved by incorporating an inaccuracy measure for the empirical distributions. Numerical experiments from three applications provide promising results concerning the application of the approach within a simulation environment. An interesting future research direction would be to determine exact analytical expressions for the distributions of performance ratio and objective value in simple settings, or to derive error bounds on the approximations obtained by simulation. The performance measurement approach is currently applied to other dynamic logistics systems such as order picking and machine shop scheduling.

References

Albers, S.: On the influence of lookahead in competitive paging algorithms. Algorithmica 18 (1997) 3, pp. 283-305.

Albers, S.: Online algorithms: a survey. Math. Programming 97 (2003) 1-2, pp. 3-26.

Allulli, L.; Ausiello, G.; Laura, L.: On the power of lookahead in on-line server routing problems. Theoretical Computer Science 408 (2008) 2-3, pp. 116-128.

Boyar, J.; Irani, S.; Larsen, K. S.: A comparison of performance measures for online algorithms. In: Dehne, F; Gavrilova, M.; Sack, J.-R.; Tóth, C. D. (Eds.): Algorithms and Data Structures. Berlin, Heidelberg: Springer 2009, pp. 119-130.

Breslauer, D.: On competitive on-line paging with lookahead. In: Puech, C. (Ed.): STACS 96 - Proceedings of the 13th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer 1996, pp. 593-603.

Borodin, A.; El-Yaniv, R.: Online computation and competitive analysis. 1. pbk. ed. Cambridge, New York: Cambridge University Press 2005.

Cassandras, C. G.; Lafortune, S.: Introduction to discrete event systems. 2. ed. New York: Springer 2008.

Hiller, B.; Vredeveld, T.: Probabilistic alternatives for competitive analysis. Computer Science Research and Development 27 (2012) 3, pp. 189-196.

Jaillet, P.; Wagner, M. R.: Online routing: Value of advanced information as improved competitive ratios. Transportation Science 40 (2006) 2, pp. 200-210.

Lavrov, A.; Nickel, S.: Simulation und Optimierung zur Planung von Kommissionierungssystemen. VDI-Seminar, 2005. Ceded for use by Nickel, S.

März, L.; Krug, W.: Kopplung von Simulation und Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Eds.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, pp. 41-45.

VDI: VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. In: VDI (Ed.): VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik Band 8. Berlin: Beuth 1993.

Woeginger, G.; Fiat, A.: Online algorithms - State of the art. Berlin: Springer 1998.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

From space to manufacturing industry: New approaches of eRobotics to serve todays and future manufacturing needs

Aus dem Weltraum in die Industrie: Neue Ansätze der eRobotik, um heutige und zukünftige Anforderungen der Industrie zu erfüllen

Jürgen Roßmann, Eric Guiffo Kaigom, Linus Atorf, Christian Schlette,
Institute for Man-Machine Interaction, RWTH Aachen University, Aachen (Germany), rossmann@mmi.rwth-aachen.de, kaigom@mmi.rwth-aachen.de, atorf@mmi.rwth-aachen.de, schlette@mmi.rwth-aachen.de

Abstract: This work presents our current efforts in the development of a comprehensive, versatile and holistic simulation platform to address robot-related issues in manufacturing. Along the lines of research of eRobotics that effectively extends the well-known virtual test-bed concept, we shift robotics into virtual reality. We adequately couple different multi-body modelling and robot control paradigms to provide efficient, flexible and sustainable solutions to torque based motion planning, motion control and compliance control of robot manipulators regardless of their generation or deployment areas. The approach is particularly useful as it enhances the reliability of predictions, and offers unique possibilities to get novice users very early familiar with recent advances in service robotics. To this end, the proposed simulation approach also supports natural and intuitive interfaces, which become an effective surrogate for complex control panels, leading to a user-friendly robot manipulation.

1 Introduction

3D Simulation technology is widespread in manufacturing today. Particularly in robot-assisted manufacturing, it is usually the method of choice to quickly pre-configure a work-cell or to plan tasks (see Tokunaga et al. (2005)). However, there is often a considerable gap between the objectives that motivate the utilization of simulation in manufacturing and the outcomes driven by the simulation. Specifically, the reliability of predictions and the capability to facilitate the integration and manipulation of new generations of robot manipulators are significantly altered by different factors, stemming from the conceptual limits of the simulation approach and the lack of versatility to swiftly adapt to recent advances in service robotics. These factors include the difficulties to provide a simulation that

closely reflects the dynamic behaviour of real robot manipulators during manufacturing tasks and to cope with new demands (see Tincknell and Radcliffe (1996)) in manufacturing.

Interaction capabilities are very crucial for the feeling of involvement of humans into simulated scenarios. Humans can interactively experience and manipulate disparate objects and the simulation system responds to their actions. However, using proprietary control panels might sometimes require some technical expertise, therefore being too complex for novice users. The support of natural, flexible and intuitive interfaces (see Fig. 1) can mitigate this issue, improving the immersion and proficiency of any user, and allowing the interactive assessment of core technologies such as compliance control at a high level of safety and flexibility.

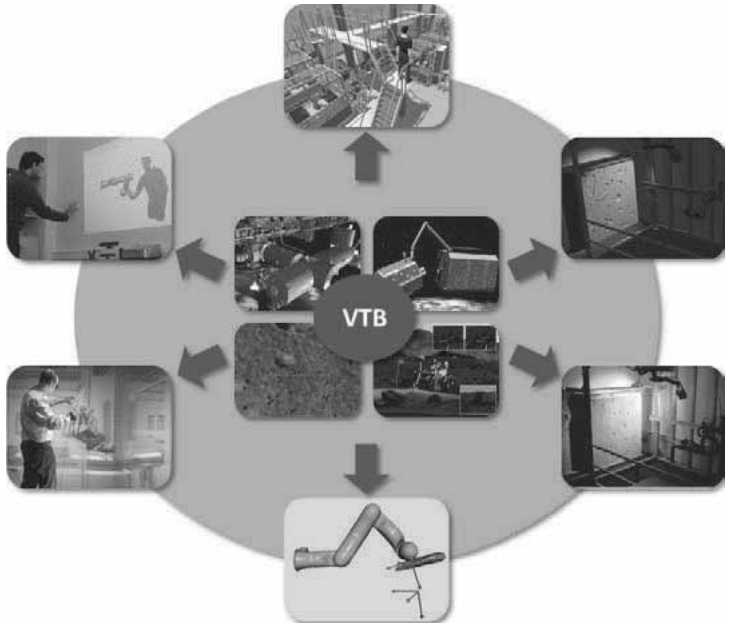


Figure 1: *Know-how gained from space robotics is transferred to manufacturing. Intuitive interfaces (left), real (bottom right) and simulated (top right) robots, simulated compliance control (bottom) and virtual factory (top).*

This work presents our current efforts in developing a simulation platform aiming at filling these niches. Our contribution is twofold. At first, along the lines of research of eRobotics (see Rossmann and Schluse (2011); Rossmann et al. (2012)) that effectively extends the well-known virtual test-bed concept and transfers experiences gained in space robotics into other areas including manufacturing (see Fig. 1), we present a realistic robot simulation that integrates kinematic robot motion planning and dynamic robot motion control down to actuation. Also, we highlight and exemplify the benefits of shifting robotics into virtual reality as a means to support the integration of new robotic technologies in the manufacturing industry and to enhance the ease of use of robot manipulators.

The remainder of the paper is structured as follows. Related works are presented in section 2. The key ideas behind eRobotics as the foundation stone for efficient and sustainable solutions in robot-assisted manufacturing applications are introduced in section 3. Section 4 is devoted to the robot motion planning and control architecture in joint and Cartesian space as well as compliance control. How virtual reality enhances the interaction capabilities of robotic systems, as well as their ease of manipulation through intuitive interfaces is introduced in section 5. Section 6 is for conclusion and discussion.

2 Related work

Robot simulation has been adopted in manufacturing as a strategic approach to improve the manufacturing cycle time and throughput (Stopper and Stuja 2004). It plays a key role in the detection of inefficiencies and opportunities in robot-assisted automation (see Neto et al. (2010)) and the prediction of the side effects of making changes (Smith et al. 1994). These approaches rely solely on a kinematic simulation of the robot manipulator. In manufacturing, task contacts and control contacts occur between the end-link and the work-piece (Kuhn et al. 2006). Then, the latter is grasped by the robot to follow a trajectory that has been generated by a kinematics controller. Here, the degree of realism would be substantially increased by modelling the work-piece and the robot end-link as physically interacting bodies with specific material properties that can accelerate under non-penetration constraints.

By strengthening a kinematic planning with a dynamic simulation and robot actuation control, the outcome of the task mentioned above closely depends on the robot guidance and on the physical interaction between the bodies. Some dynamic robot simulators are based upon generalized coordinates (i.e. joint coordinates). This approach can hardly handle arbitrary set of constraints between multi-bodies (see Baraff (1996)) in manufacturing scenarios. Further, the dynamic realization of the joint path prescribed by the kinematic planner might suffer from different effects such as frictions (see Fig. 2) that are inherent to real robots.

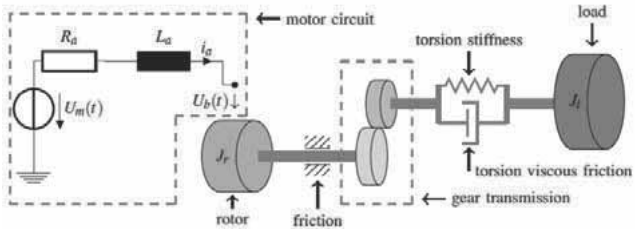


Figure 2: *The drive train model in this work that includes friction losses*

Therefore, unlike all the simulation approaches mentioned above that have neglected this aspect, it is important to extend a joint level power transmission down to actuation (see Fig. 2). Torque losses are very important, when it comes to reactively adjust the robot dynamics as reaction to external forces or torques. Such a capability

is useful for teaching a robot manipulator by touch (Grunwald, et al. 2003). Advances in torque based compliance control have led to a new generation of compliant light weight robot (LWR) manipulators that cope with this issue (Ott et al. 2004).

Nevertheless, despite their unique capabilities, only a few works have addressed the simulation of compliance control (Dixon et al. 2001; Behzadpour et al. 2009). While the former work has omitted orientation control, that is, indeed, more complicated (see Nakanishi et al. (2008)), a versatile environment that supports complex interaction scenarios based upon real human motion is not provided. This is important when it comes to assess human-centered simulation processes within the manufacturing context (Zhang et al. 2008).

Some efforts have been made to integrate real human motion into 3D simulation. In particular, Microsoft's Kinect sensor that offers new capabilities for 3D image capture and human gesture recognition has been used to capture human arm motion (Al-Kaff et al. (2012)) or to avoid collisions (Petric and Zlajpah (2011)). However, a full dynamic multi-body simulation is missing in aforementioned works. An approach for human-robot interactive demonstration has been proposed in Cheng et al. (2012), but no strategy to accommodate the dynamic robot behaviour during the interaction was taken into account.

3 eRobotics and virtual reality

In this work, the goals pursued are, on the one side, to uniformly accompany the integration, understanding and analysis of traditional robots as well as new generations of compliant LWR manipulators within the manufacturing context. On the other side, the benefits that result from the synergy between virtual reality and robotics has to be maximized and exploited to overcome common issues related to robotic hardware, for instance, in terms of fast scenario analysis, component re-use, development costs and development time constraints. In addition, the capabilities of robotic systems can be extended through the integration of new functionalities, including the support of diverse user interfaces to enhance the ease of manipulation.

Reaching these goals set demanding requirements on a simulation platform that arise from the complexity of the problem at hand and the expectations when it comes to address such a multidisciplinary issue. The former aspect is related to the fact that it is indispensable to capture the key properties and specificities of the single heterogeneous and multidisciplinary sub-systems (e.g. humans, robots, etc.) involved in the simulated scenarios (see Fig. 1). The latter aspect strictly requires a faithful, holistic and versatile simulation of the overall system as a whole in order to best cope with complex scenarios and new demands.

To realize these objectives, we exploit the comprehensive, unique capabilities of eRobotics (Rossmann and Schluse 2011). The eRobotics methodology can be apprehended as an efficient extension of the well-known virtual test bed approach. It puts a great emphasis on collaborative development and distributed high computing performance to transfer know-how gained from space robotics activities to other research and application areas (see Fig. 1), including industrial automation and manufacturing (Rossmann et al. 2012). The key principles stressed by eRobotics to successfully address above mentioned issues are a realistic, holistic simulation

approach that is flexible, scalable and swiftly adaptable to new demands in manufacturing, expandable to almost any other application and research field while substantially cutting down costs.

4 Motion planning and control of robot manipulators

We couple together different multi-body simulation paradigms and combine their respective strengths in order to provide a comprehensive multi-body simulation that supports the most complex multi-body constraints. The approach allows a realistic, systematic modelling, planning and control of a wide range of robot manipulators. The highly modular coupling approach is shown in Figure 3.

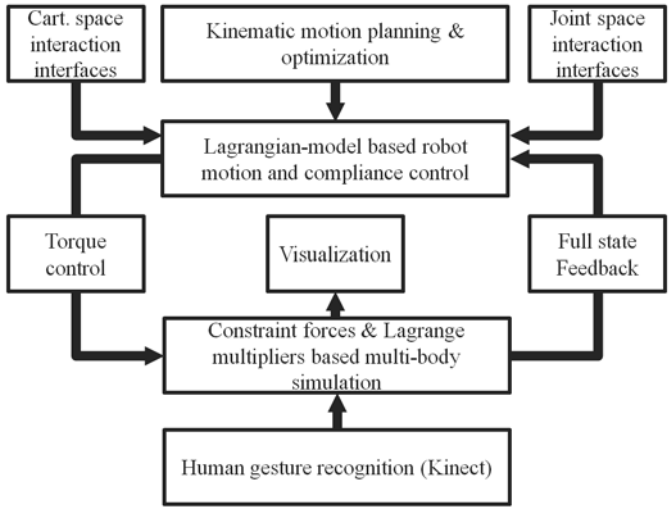


Figure 3: *Coupled modelling, simulation, control and interaction paradigms*

We will give a short overview of the motion planning and control modules below.

4.1 Kinematics module

The kinematics block serves as motion planning and motion optimization module both in joint and Cartesian space. It supports the usual industrial robot motion types including continuous-path, point-to-point and circular path, as well as the optimization in real time of second constraints by using kinematic null-space motions that characterize redundant robot manipulators such as a LWR. One of the particularities of the kinematics module is that it allows the modelling of multi-robots that are controlled as multi-agent systems. This approach is useful for the coordination of robot manipulators as well as work-flow optimization in manufacturing (see Fig. 1) and the modelling of the human body to analyse ergonomic conditions at manual manufacturing workspaces (Schlette and Rossmann 2009).

4.2 Multi-body dynamics module

A key objective during the development of the multi-body dynamics module was to provide a uniform handling of disparate constraints (contact, impact, non-holonomic constraints, etc.) that might occur between interacting bodies and that are specific to manufacturing systems (e.g. a rotating flexible joint between two bodies). To tackle this issue, the multi-body dynamics simulation used to model the robot as well as its surrounding environment (human, work-cell, work-pieces, etc.) is based upon the Lagrange multipliers and constraint forces formalism (Jung 2011).

4.3 Robot motion control module

The dynamic robot motion control receives desired joint profiles (i.e. position, velocity and acceleration) from the kinematics module and controls the joint torques in such a way that the dynamic robot model tracks the wished joint motion without overshooting. Unlike the constraints based robot simulation introduced above, the robot control in this work relies on a Lagrangian robot model expressed in joint coordinates (Ott et al. 2004).

4.3.1 Joint space motion control

In free space, the robot motion is controlled using the computed torque method. The robot is feedback-linearized at acceleration level and a global exponential stability is given. This approach is particularly useful as it allows a highly accurate overshooting-free path tracking. In case of hard external disturbances, a passivity based feed-forward and PD-control is used for trajectory tracking. The latter turned out to be more robust in such a case as the computed torque method.

4.3.2 Cartesian space motion control

Controlling the motion of the TCP in Cartesian space is not only a natural choice, it is also an intuitive approach. According to the torque superposition principle in operational space, we decouple the control torque τ_c in two terms.

$$\tau_c = \tau_T + \tau_N \tag{1}$$

The term τ_T corresponds to joint torques related to the operational force moving the TCP dynamics in all six DoFs. A quaternion based parameterization of the TCP orientation was developed. As the robot might be redundant, the entire robot configuration cannot be described in Cartesian space. In fact, the pseudo-inertia matrix associated with the equation of motion in Cartesian space does not depend on the TCP pose anymore, but rather on the joint configuration. Therefore, the second term τ_N stabilizes the null-space motion by projecting the negative gradient of the cost function of a second constraint in addition to a joint velocity dependent damping term onto the null-space of the transposed TCP-Jacobian. The null-space is built upon the dynamically consistent pseudo-inverse of the TCP-Jacobian (Oetomo et al. 2002). A typical second constraint we support is the desired robot posture during Cartesian motion control.

4.3.3 Compliance control

The robot manipulator is made compliant for interaction purposes (see Fig. 4) with the environment by imposing a dynamic relationship (mass-damper-spring) between the forces and moments acting on the TCP and the time derivatives of the TCP pose error with respect to the desired pose. The desired inertia matrix is set equal to the operation space pseudo-inertia matrix. Doing so has the advantage that we do not need to measure external force acting on the TCP. The sum of TCP pose and velocity error weighted respectively with the corresponding damping and stiffness matrix is seen as the virtual force acting on the TCP. Besides the gravity compensation term, the posture is controlled with the same approach outlined in the Cartesian position control.

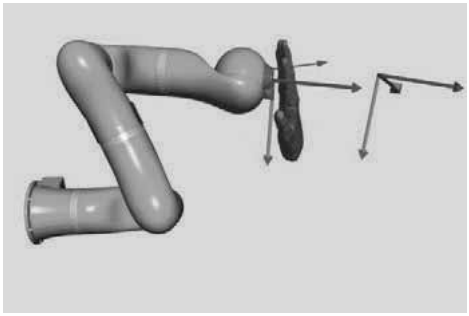


Figure 4: *Interaction with a virtual compliant LWR manipulator*

5 User-friendly robot guidance

Programming simple motion for a robot manipulator by using traditional control panels is a tedious and time-consuming task. In order to make such tasks easier even for novice users, we replace traditional control panels by intuitive interfaces. The human intention is captured over these interfaces and processed in the simulation. The latter commands joint positions that best suit to the human intention.

5.1 Microsoft Kinect based control

A first approach is to develop interaction capability between a virtual human with real life motion of a human and the simulated and compliance controlled robot manipulator. We use the Microsoft Kinect sensor as gesture recognition. It provides a kinematic skeleton of the human in real-time. In order to interact with the robot, the skeleton is endowed with rigid body capabilities and material specificities (e.g. stiffness). The dynamic motion of the virtual human is projected onto the multi-body simulation (see Fig. 5). Doing so, the human operator can easily superimpose his/her motion over the compliant robot dynamics. This interaction can be further projected onto quotidian manufacturing activities, whether to get users familiar with compliant robots within their working fields or to assess their benefits and performance.

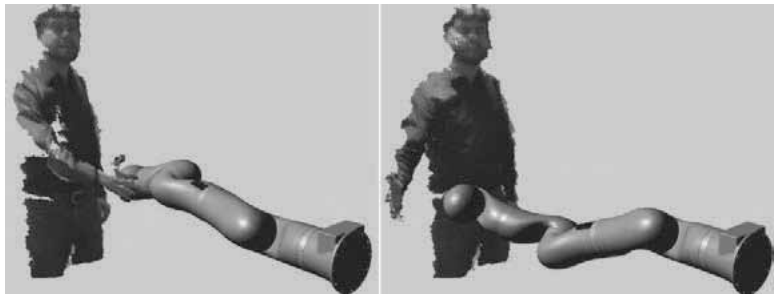


Figure 5: *Microsoft Kinect based interaction with a virtual compliant LWR manipulator*

5.2 Space-mouse based control

Certain tasks such as the guidance of a robot mounted camera require a specific TCP-centered guidance of the robot manipulator. Traditional control panels are rather unwieldy for such a task. Here, a simple space-mouse becomes an effective surrogate for complex control panels. The simulated, Cartesian or impedance controlled robot follows the TCP frame specified by using the space-mouse. Doing so allows novice operators a more natural, flexible and intuitive interaction in real-time with the tool center point of a robot in the full 6 DoF. If required, the generated joint motions are fed into the real robot control to achieve the simulated task.

6 Conclusion

Our current development efforts in providing a platform that enables a realistic simulation of robot manipulators to serve current and future needs in the manufacturing industry have been presented. We particularly used the comprehensive unique capabilities of eRobotics to couple a kinematics planning, a constraint-forces based dynamic simulation of multi-bodies and a Lagrangian-model based control of torque to command simulated robot manipulators in joint and Cartesian space as well as in compliant mode. While the former two control modes enhance the realism of simulation and therefore allow a more accurate prediction and physical tasks planning, compliance control in a simulator will foster the early and safe familiarization of novice users with future compliant robots. Moreover, it offers the possibility to assess the unique capabilities of compliant robots in a wide range of manufacturing applications. This will be possible in almost any environment, with substantially less engineering and portability effort with regard to outdated, current and future generation of robot manipulator such as LWR and at low costs. In our approach, computer simulation acts as a bridge between intuitive interfaces and real hardware, enabling the enhancement of the ease-for-manipulation of robots in manufacturing activities.

References

Al-kaff, A.; Rodrguez S.; Bensalah, C.;Quijano, J.; Abderrahim, M.: Human face and hand detection for human-robot interaction using rgb-d kinect sensor. 5th International Conference on Cognitive Systems, COGSYS. Vienna, 2012.

Baraff, D.: Linear-time dynamics using Lagrange multipliers. Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1996. pp. 137-146.

Behzadpour, B.; Moghaddam, M.; Arbabtafti, M.: Dynamic Modeling and Control simulation of a Haptic. Proceedings of the 2011 IEEE international Conference on Robotics and Biomimetics. 2011. pp. 2993-2998.

Cheng, L.; Sun, Q.; Su, H.; Cong, Y.; Zhao, S.: Design and implementation of human-robot interactive demonstration system based on kinect. Control and Decision Conference (CCDC). 2012. pp. 971–975.

Dixon, W.E.; Moses, D.; Walker, I.D.; Dawson, D.M.: A Simulink-based robotic toolkit for simulation and control of the PUMA 560 robot manipulator. Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on. 2001. pp. 2202-2207.

Grunwald, G.; Schreiber, G.; Albu-Schaffer, A.; Hirzinger, G.: Programming by touch: the different way of human-robot interaction. Industrial Electronics, IEEE Transactions on. 2003. pp. 659-666.

Jung, T.: Methoden der Mehrkörperdynamiksimulation als Grundlage realitätsnaher Virtueller Welten. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2011.

Kuhn, S.; Gecks, T.; Henrich, D.: Velocity control for safe robot guidance based on fused vision and force/torque data." Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2006 IEEE International Conference on. 2006. pp. 485--492.

Nakanishi, J.; Cory, R.; Mistry, M.; Peters, P.; Schaal, S.: Operational space control: A theoretical and empirical comparison. The International Journal of Robotics Research. SAGE Publications, 2008. pp. 737-757.

Neto, P.; Pires, J.N.; Moreira, A.P.: Robot path simulation: a low cost solution based on CAD. Robotics Automation and Mechatronics (RAM), 2010 IEEE Conference on. 2010. pp. 333--338.

Oetomo, D.; Ang Jr., M.; Jamisola, R.; Khatib, O.: Integration of torque controlled arm with velocity controlled base for mobile manipulation: An application to aircraft canopy polishing. Fourteenth CISM-IFToMM Symposium on Robotics RoManSy. 2002. pp. 308-317.

Ott, C.; Albu-Schaffer, A.; Kugi, A.; Stamigioli, S.; Hirzinger, G.: A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots-part I: Torque feedback and gravity compensation. Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. 2004. pp. 2659-2665.

Petric, T.; Zlajpah, L.: Smooth transition between tasks on a kinematic control level: Application to self collision avoidance for two kuka lwr robots. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), . 2011. pp. 162-167.

Rossmann, J.; Schluse, M.; Schlette, C.; Waspe, R.: Control by 3D Simulation--A New eRobotics Approach to Control Design in Automation. Lecture Notes in Computer Science Volume 7507. Springer, 2012. pp. 186-197.

Rossmann, J.;Schluse, M.: Virtual Robotic Testbeds: A Foundation for e-Robotics in Space, in Industry - And in the Woods. Developments in E-systems Engineering (DeSE). 2011. pp. 496-501.

Schlette, C.; Rossmann, J.: Robotics enable the Simulation and Animation of the Virtual Human. Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009. International Conference on. 2009. pp. 1-6.

Smith, J.S.; Wysk, R.A.; Sturrock, D.T.; Ramaswamy, S.E.; Smith, G.D.; Joshi, S.B.: Discrete event simulation for shop floor control. Simulation Conference Proceedings, Winter. 1994. pp. 962-969.

Stopper, M.; Stuja, K.: Optimizing cycle time of flexible manufacturringt cell using simulation software. 4th International DAAAM Conference. 2004.

Tincknell, D.; Radcliffe, D.: A generic model of manufacturing flexibility based on system control hierarchies. Edited by Taylor \& Francis. International Journal of Production Research. 1996. pp. 19-32.

Tokunaga, H.; Matsuki, N.; Sawada, H.; Okano, T.; Furukawa, Y.: A robot simulator for manufacturing tasks on a component-based software development and execution framework. Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing, 2005.(ISATP 2005). The 6th IEEE International Symposium on. 2005. pp. 162-167.

Zhang, X.; Schmidt, L.; Schlick, C.M.; Reuth, R.; Luczak, H.: A human task-oriented simulation study in autonomous production cells. International Journal of Production Research, Volume 46, Issue 18,. 2008. pp. 5013-5041.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Development of a Simulation-based Optimisation Environment for a Capacitated Multi-Echelon Production-Inventory System

Entwicklung einer simulationsbasierten Optimierungsumgebung für ein mehrstufiges kapazitiertes Produktionsbestandssystem

Mustafa Güller, TU Dortmund, Dortmund (Germany), guller@lfo.tu-dortmund.de
Bernd Noche, Universität Duisburg-Essen, Dusiburg (Germany), bernd.noche@uni-due.de

Abstract: One of the most important aspects affecting the performance of a supply chain is the management of inventories. Managing inventory in complex supply chains is typically difficult, and may have a significant impact on the customer service level and system-wide cost. In this paper, we present an efficient way using simulation-based optimisation approach for optimal inventory control of a multi-echelon production-inventory system under the continuous review policy. The Pareto dominance concept is implemented to find a set of near optimal solutions for determining the best trade-off between objectives. The Multiobjective Particle Swarm Optimisation (MOPSO) algorithm is used to determine the appropriate inventory control parameters to minimize the total inventory cost and maximize the service level. We have built an object-oriented simulation tool to evaluate the control parameters generated by the MOPSO.

1 Introduction

Today, most companies source globally, produce in various plants and serve customers all over the world with a complex distribution network which has several stock points linked by various activities. Globalization of supply chains brings some challenges as well as benefits. If an item moves through more than one step before reaching the final customer, the supply chain is called multi-echelon supply chain. To meet new challenges, Supply Chain (SC) members must focus on the coordination and control of the multi-echelon system. Due to the growing complexity of these networks, efficient and effective inventory management in the supply chain become more important in order to improve the customer service level and reduce the whole system cost. Inventory cost is one of the major logistics costs that need to be optimized in any logistic system. As mentioned in Silver and Peterson (1985), 34% of the current assets and 90% of the working capital of a

typical company in USA are tied up in inventories. However, managing inventories in a dynamic environment and under uncertainty is typically difficult. It is easy to see that almost every inventory problem involves multiple and conflicting objectives which need to be optimized simultaneously such as maximizing the profit of each participant enterprise and minimizing the total cost of the system. Many researchers have dedicated themselves to deal with inventory problems involving more than one objective over the past several decades. The role of the inventory management is to try to find a way to minimize the level of their stocks without negatively impacting availability or customer service levels.

In the past, classical analytical techniques using mathematical programming methods such as probability theory have been used to obtain the approximate solution of multi-echelon inventory systems. Although analytical models are useful in many cases, they are not able to efficiently deal with the uncertainty and SC dynamics because of the inability of representing stochastic behaviours or highly complex relations between the different entities existing in real-world problems (Mele et al. 2006). Unlike traditional mathematical models, simulation is a powerful computer-based tool that enables to model the complex and uncertain situations of the real-world problem without the limiting assumptions (Banks, 2000).

Although computer simulation technology has been widely used as one of the most powerful technologies for analysing and improving enterprises' supply chain and logistics operations, simulation provides no concrete solutions to optimisation problems. Since users need to evaluate many feasible solutions in order to find a good solution to the problem, they may require large amounts of development and running time, which typically makes them inadequate for solving problems (Keskin et al. 2010). In the simulation-based optimisation approach, optimisation techniques are integrated into the simulation analysis. In mathematical programming the decision variables are assigned in an analytical function of decision variables. This function is known as the objective function. In the simulation-based optimisation, the performance measure becomes one (or a function of several) of the responses generated by a simulation model (Ammerie et al. 2010; Mele et al. 2006). The goal of simulation-based optimisation (SBO) is to find the best solution variables among many sets of model specifications (e.g. selected warehouse, allocation of customers, inventory control parameters) that lead to the optimal performance without explicitly evaluating each possibility (Carson & Maria, 1997).

In recent years, metaheuristic algorithms such as, Evolutionary Computation (EC), Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS), Particle Swarm Optimisation (PSO), and others, have been applied to various optimisation problems as a successful alternative to classical approaches (Silvia et al. 2003; Altiparmak et al. 2006). An evolutionary computation to find the non-dominated solutions for stochastic multiobjective (R,Q) inventory control systems is presented by Tsou (2009). He proposed two evolutionary optimizers, multiobjective electromagnetism-like optimisation (MOEMO) and multiobjective particle swarm optimisation (MOPSO). Computational results show that the evolutionary Pareto optimizers are fast algorithms that generate the non-dominated policies in term of lot size and safety stock. Hiremath et al. (2010) applied enhanced particle swarm optimisation (EPSO) to solve a three stage inventory problem to address the outsourcing issues with different shipment policies. A Particle Swarm Optimisation algorithm is proposed to maintain the optimal stock levels in the supply chain by Narmadha et al. (2010).

Their proposed methodology reduced the total supply chain cost as it undoubtedly established the most probable excess stock level and shortage level along with the consideration of lead time in supplying the stocks. Silva and Choello (2007) developed an optimisation model of a simplified supply chain based on PSO, including stocks, production, transportation and distribution, in an integrated production-inventory-distribution system.

Our study differs from those listed above in some ways such as varieties of complex factors, stochastic customer demand, different customer arrival distributions, the distance and the quantity dependent transportation cost, stochastic lead time, and the limited manufacture producing capacity, etc. The primary objective of this research is the development of a simulation-based optimisation tool for a multi-echelon capacitated production-inventory system to find the optimal inventory policies for each facility in a supply chain under a stochastic environment. A brief description of Particle Swarm Optimisation is presented in Section 2. The detail of the proposed simulation-based optimisation approach is given in Section 3. Section 4 discusses the case study and computational results. Finally, Section 5 concludes the current work and provides directions for the further research.

2 Particle Swarm Optimisation (PSO) Overview

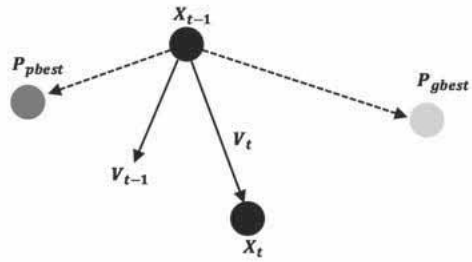
Particle swarm optimisation (PSO) is a stochastic optimisation technique based on population inspired by social behaviour (Kennedy & Eberhart, Particle swarm optimization, 1995). The PSO algorithm consists of a swarm of particles representing a solution point in a multidimensional, real valued search space of possible solutions. Each particle maintains its position in the search space with a velocity under the influence of the best solution found so far by each particle (the personal best) and the best solution found so far by the whole swarm (the global best) (Fig. 1). The last part considered in the PSO algorithm is the inertia part that is the memory of its previous velocity. In the n-th dimension of the search space, the calculation of each particle's velocity (V^n) and position (X^n) is achieved by following formulae:

$$V_t^n = w \times V_{t-1}^n + C_1 \times rand_1 \times \left(P_{pbest}^n - X_{t-1}^n\right) + C_2 \times rand_2 \times \left(P_{gbest}^n - X_{t-1}^n\right) \quad (1)$$

$$X_t^n = X_{t-1}^n + V_t^n \quad (2)$$

where

n	number of elements in a particle,
w	inertia weight of the particle,
t	generation number,
C_1, C_2	acceleration constants,
$rand$	random value between 0 and 1
P_{pbest}^n	local best position of the particle,
P_{gbest}^n	global best position of particle in the swarm.



X_{t-1}: current position, X_t : modified position, V_{t-1}: current velocity, V_t: modified velocity,

P_{pbest}: *local best position,* P_{gbest}: *global best position*

Figure 1: *Concept of modification of a searching point by PSO*

2.1 Multiobjective Particle Swarm Optimisation (MOPSO)

Multiobjective problems are very complex and quite hard to solve by conventional optimisation techniques. In order to apply the PSO strategy for solving multiobjective optimisation problems, it is obvious that the original scheme has to be modified. Most multiobjective PSO works with the domination concept. There usually exists a set of solutions for the multiple objective cases which cannot simply be compared with each other. The non-dominated solutions are defined as a solution which dominate the others but do not dominate themselves. A solution X in the objective space is called Pareto-optimal (non-dominated solution), if and only if there is no other solution Y in the search space which could dominate X. In other words, X dominates Y, if X is better than Y in at least one objective function and not worse with respect to all other objective functions (Yu & Gen, 2010). The set including all Pareto-optimal solutions is termed the Pareto set.

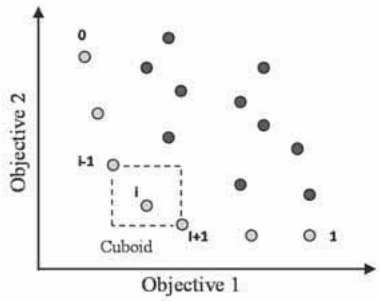


Figure 2: *Crowding distance calculation*

One of the successful applications of PSO to multiobjective problems was proposed by Sierra and Coello Coello (2005), which is based on Pareto dominance and the use of a crowding factor to determine the direction for each particle. Compared with the original PSO, multiobjective PSO uses a set of leaders which is usually stored in a

different place from the swarm. The leaders archive includes the best non-dominated solutions found since the beginning of the optimisation. At each generation, the global best solution is randomly selected using a roulette wheel selection in the leaders archive and a density measure based on the crowding distance of particles (Fig. 2).

3 Simulation-based Optimisation Approach

In this research, the simulation model is conceptualized and developed following object-oriented principles and is implemented using the Microsoft Visual C-Sharp programming language which is one of several languages that support object-oriented programming. Traditional commercial discrete event simulation software presents two problems: (i) difficulties in modelling complex scenarios; (ii) too many entities could cause computational heavy simulation models (Cimino et al. 2010; Chatfield et al 2006). An object-oriented simulation system provides researchers with a flexible and extendible simulation tool designed to address the complexities in modelling supply chains. Biswas and Narahari (Object Oriented Modeling and Decision Support for Supply Chain, 2002) classified the elements of an object library of a simulation tool for supply chain networks into two categories: structural objects and policy objects. As the structural objects define the physical entities of networks, the policy objects describe the protocols used in procurement, manufacturing, transportation, and distribution of material within the supply chain. The current framework consists of various classes representing elements within a supply chain such as factory, warehouse, retailer, supplier, and customer.

The methodology used for solving the multiobjective inventory problem involves two phases as shown Figure 3 (Niranjan 2008):

- At the first phase, a multiobjective procedure based on MOPSO algorithm is used to determine both the reorder point and the order quantity of each stock point.
- At the second phase, the developed object-oriented simulator is used to evaluate the supply chain performance measures, according to different criteria: customer service level, fill rate, number of backordered items, and total cost.

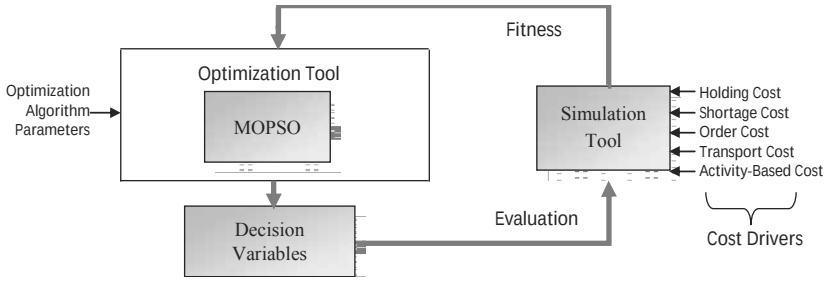


Figure 3: *Simulation-based optimisation scheme based on MOPSO for the inventory problem*

An individual in MOPSO algorithm is an array of inventory decision variables of the problem under study. In an n-facility supply chain problem, the decision variables

for the optimisation procedure include an order quantity vector $[Q_1, Q_2, \dots, Q_n]$ and a reorder point vector $[R_1, R_2, \dots, R_n]$. The initial population is generated randomly based on the upper and lower bound for each of the decision variables using a uniform distribution $U[R_i^{LB}, R_i^{UB}]$ and $U[Q_i^{LB}, Q_i^{UB}]$.

4 Description of the Case Study and Computational Results

The research approach and modelling methodology was applied to the supply chain of a major food product company in Europe. The given network consists of 1 manufacturing sites, 1 plant warehouse, 19 regional distribution centres (DC), and approximately more than 1000 retailers spread over the country (Fig. 4). The regional distribution centres are located in the network to help for pool risk and consolidating shipments from the plant warehouses. At any moment of time, the manufacturing facility is idle and producing the given item with a capacitated production rate. Each distribution centre receives daily orders of items from retailers and customers. The average daily demand is fitted to some of the theoretical probability distributions using historical sales data of DCs.

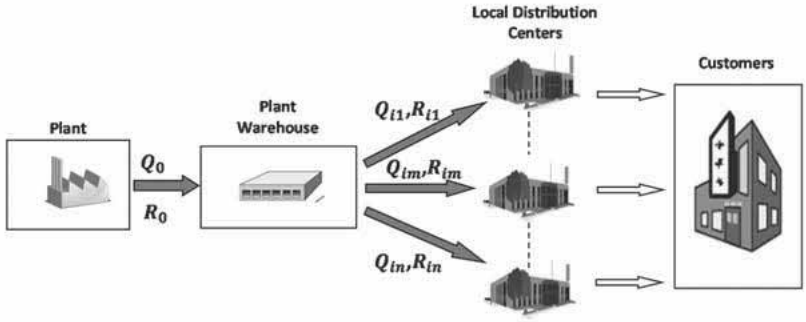


Figure 4: *Simulation of two-echelon divergent production-inventory model*

The interrelationship between transportation cost, shipment sizes and distance adds another dimension of the complexity to incorporate the transportation cost into the inventory analysis. In this research, the distance dependent cost for a truck based on the full vehicle load is assumed to be $5{,}46 \times (Distance)^{-0{,}278}$ vehicle-km (Janic, 2007). The LTL transportation cost rates offered by the transportation 3rd party for four major distances, which are approximately 100, 250, 500 and 1,000 km in length, is illustrated in Figure 5 (Aldarrat, 2007).

The run length of the simulation experiment is 365 days. The particle swarm optimisation parameters are as follows: the swarm size is 40, the maximum archive size is 40 and the number of iterations is 100.The distribution of the Pareto optimal set over the trade-off surface is shown in Figure 6. It can be seen that solutions are widely distributed over the Pareto-optimal front due to the diversity of the non-dominated solutions in the proposed simulation-based MOPSO technique and the problem under study is solved effectively. The non-dominated solution that represents the best cost with related example inventory parameters is given in Table

1. For example, the service level of 100% produced a daily cost of 7.549 € while 89% service level produced a daily cost of 6.827 €.

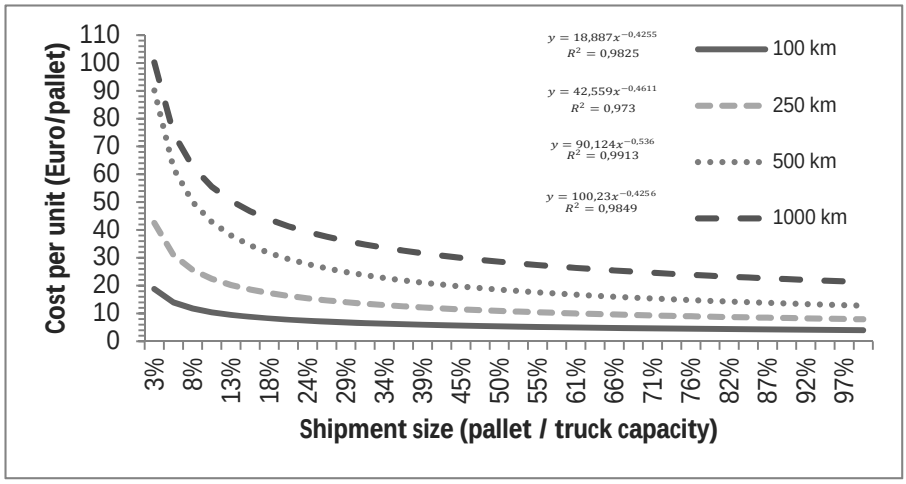


Figure 5: *Examples of freight rates (distance-shipment based)*

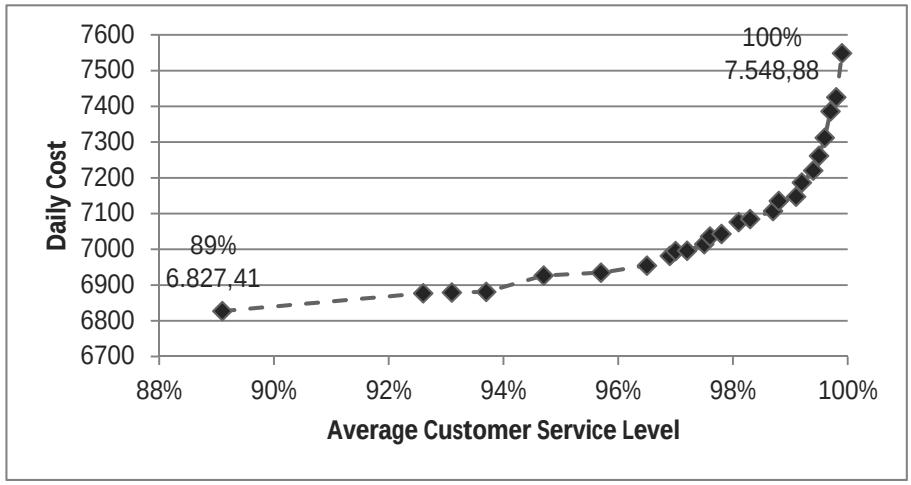


Figure 6: *Final Pareto front of MOPSO-SO for the production-inventory system*

Table 1: *The non-dominated solution that represents the best cost with related example inventory parameters*

	DC1	DC3	DC7	DC10	DC14	DC18
R	24	37	30	35	31	53
Q	75	81	109	75	148	137

5 Conclusion

This research introduces a simulation-based optimisation tool to analyse inventory control parameters in a multi-echelon production-inventory system under the continuous review policy in order to minimize the total system wide cost and maximize the customer service level. This study suggests the concept of MOPSO to find a set of near optimal solutions for multiple objectives. It has been shown that the MOPSO algorithm is a powerful, intelligent optimisation algorithm that is able to obtain non-dominated solutions of the multiobjective inventory problem. The problem can be extended in the future to include other inventory policies, different supply chain configurations, capacity limitations, uncertain costs, and raw material availabilities.

References

Aldarrat, H. S. M.: Modeling and controlling of an integrated distribution supply chain: Simulation-based shipment consolidation heuristics. PhD Thesis, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, University of Duisburg-Essen, 2007.

Altiparmak, F.; Gen, M.; Paksoy, T.: A genetic algorithm approach for multiobjective optimisation of supply chain networks. Computer and Industrial Engineering 51 (2006), pp. 196-215.

Ammeri, A.; XChabchoub, H.; Hachicha,W.; Masmoudi, F.: A Comprehensive literature classification of simulation optimisation method. The 9th International Conference on Multiple Objective Programming and Goal Programming. Sousse (Tunisia), 24.- 26. May 2010.

Banks, J.: Introduction to simulation. In: Joines, J.A.; Barton, R.R.; Kang, K.; Fishwick, P.A. (Eds.): Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando (USA), 10.-13. December 2000.

Biaswas S. and Narahari Y.: Object-oriented modelling and decision support for supply chain. European Journal of Operational Research 153 (2002) 3, pp. 704-726.

Borshchev, A,; Filippov, A.: From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In: Kennedy, M.; Winch, G.W.; Langer, R.S.; Rowe, J.I.; Yanni, J.M. (Eds.): Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford, England, 25.-29. July 2004.

Carson, Y.; Maria, A.: Simulation optimisation: methods and applications. In: Withers, D.H.; Nelson, B.L.; Andradottir, S.; Healy, K.J. (Eds.): Proceedings of

the 1997 Winter Simulation Conference (WSC), Atlanta (USA), 7.-10. December 1997, S. 118-126.

Chatfield, D.; Harrison, T. P.; Hayya. J.C.: SISCO: An object-oriented supply chain simulation system. Decision Support Systems 42 (2006) 1, pp. 422–434.

Cimino, A.; Longo, F.; Mirabelli, G.: A general simulation framework for supply chain modeling: state of the art and case study. International Journal of Computer Science Issues 7 (2010) 3, pp. 1-9.

Gen, M.; Cheng, R.: Genetic algorithms and engineering optimisation. New York, NY: Wiley, 2000.

Hiremath, N. C.; Sahu, S.; Tiwari, M.K.: Optimisation for efficient supply chain using swarm intelligence: an outsourcing perspective. Proceedings of the World Congress on Engineering, London (UK), 1.-2. July 2010.

Janic, M.: Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. Transportation Research Part D 12 (2007), pp. 33-44.

Jones, D.; Mirrazavi, M.; Tamiz, M.: Multiobjective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art. European Journal of Operational Research 137 (2002) 1, pp. 1-9.

Kennedy, J.; Eberhart, R.: Particle swarm optimisation. IEEE Conf. Neural Networks IV, 27.-30. November 1995, pp. 1942-1948.

Keskin, B.; Melouk, S.H.; Meyer, I.L.: A simulation-optimisation approach for integrated sourcing and inventory decisions. Computers & Operations Research 37 (2010) 9, pp. 1648–1661.

Mele, F. D.; Guillen, G.; Espuna, A.; Puigjaner, L.: A simulation-based optimisation framework for parameter optimisation of supply chain networks. Industrial & Engineering Chemistry Research 45 (2006) 9, pp. 3133-3148.

Narmadha, S.; Selladurai, V.; Sathish, G.: Efficient inventory optimisation of multi product, multiple suppliers with lead time using PSO. International Journal of Computer Science and Information Security 7 (2010) 1, pp. 180-189.

Sierra, M. R.; Coello Coello, C.A.: Improving PSO-based multiobjective optimisation using crowding, mutation and ε-dominance. In: Coello, C.C.; Arturo, H.A.; Eckart, Z (Eds.): Proceeding of Third International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimisation, Guanajuato, (Mexico), 9.-11. March 2005, S. 505-519.

Silva, C. A.; Runkler, T.A.; Sousa, J.M.C; Sa da Costa, J.M.G.: Optimisation of logistic processes in supply chains using metaheuristics. In: LNAI2902 (2003), pp. 9-23.

Silva, L. A.W.; Coelho, L.D.S.: An adaptive particle swarm approach applied to optimisation of a simplified supply chain. 19th International Conference on Production Research, Valparaiso (Chile), 29. July- 2. August 2007.

Silver, E. A.; Peterson, R.: Decision systems for inventory management and production, 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons 1985.

Tsou, J.: Evolutionary Pareto optimizers for continuous review stochastic inventory systems. European Journal of Operational Research 195 (2009) 2, pp. 364–371.

Yu, X.; Gen, M.: Introduction to evolutionary algorithms. Springer-Verlag 2010.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Hybrid Models of Queuing Networks in Matlab: Experiences in Modeling, Simulation and Data Analysis

Hybride Modelle von Warteschlangennetzwerken in Matlab: Erfahrungen im Bereich Modellierung, Simulation und Datenanalyse.

Daniel Huber, Arizona State University, Tempe (USA), d@nielhuber.de

Abstract: This paper presents how Matlab was used in creating and experimenting with a hybrid model of a series of M/M/1 queues with limited queue capacity. In the model a discrete event model is coupled with a model based on hyperbolic conservation law. The modelling concept for building discrete event models in Matlab is discussed and parts of the hybrid model are presented in detail, especially how to couple the discrete event and continuous models. After that the use of user-written scripts and functions to efficiently conduct a large set of simulation replications by using parallel processing is presented.

1 Introduction

A hybrid model, consisting of a discrete event simulation (DES) and a continuous part was developed to improve existing methods of model simplification. The hybrid model is the simplification of the complex original model, which is a DES model of a flow shop system. In the most abstract form, these systems can be modelled as a series of M/M/1 queues. In a general DES simulation tool, this is modelled as a series of pairs of queues and servers with a source in front and a sink at the end. In basic queuing theory the queue in a M/M/1 system has unlimited capacity, which is not a realistic assumption for most real life flow shop applications. Thus the queues in the original model have a limited capacity. The original model is shown in Figure 1.

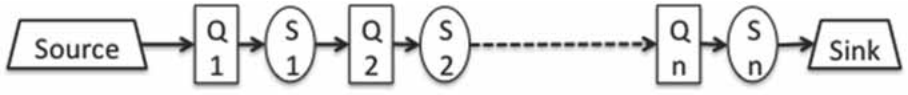


Figure 1: *Original Model*

A common method to simplify DES models like this is to identify the bottleneck server in the line, keep it untouched and aggregate all other queues and servers to one delay in front and after this bottleneck (Johnson et al. 2005, Huber and Dangelmaier 2009). Though the quality of this simplification method is relatively good, a research project was started to investigate if using a continuous model of the aggregated queues and servers to control the delay could further improve the quality of the results.

Since in the beginning of the project it was not clear which form of continuous model would be used, a development platform was needed that allowed easy coupling of DES with general continuous models, was inexpensively accessible and was a mature product.

The choice fell on Matlab (www.mathworks.com/products/matlab/): it has a DES extension 'SimEvents', which can use Matlab functionality; the Arizona State University, like many universities, has floating licences and it is a well maintained software tool with frequent updates and a huge user base.

In the following sections the author will give a short introduction into Matlab, a more detailed presentation of its discrete event-modelling environment SimEvents, a detailed view on parts of the developed hybrid model and a description of how Matlab can be utilized for efficient experimentation. The theoretical basis of the continuous model, the development and the performance of the hybrid model are not focused in this paper.

2 Modelling Concept

Matlab is a software tool for numerical computing focusing on matrix manipulation. It is also a 4th generation programming language. It allows plotting of functions and multidimensional numerical data, implementation of algorithms, symbolic computing and the graphical modelling, simulation and analysis of multidomain dynamic systems. The latter feature is provided by Simulink, which is tightly integrated into Matlab. The Simulink extension SimEvents is designed to model and simulate general discrete event systems. To give the reader an idea how modelling and simulation works in SimEvents and how Matlab and Simulink functionality can be accessed and integrated, the modelling concept shall be presented.

In general, as in most DES tools, entities are created in a source and terminated in a sink. Sources and sinks are building blocks of the model, as are servers, queues, random number generators, etc. Each of these material flow blocks has zero or more input and output channels for entities. Links are used to connect two channels. Besides these material flow channels there are channels for numerical information (input or output data) and channels for control signals. Links for information or control signals can be split, to deliver the information/signal to more than one recipient. These links can also be joined, creating a vector with the values of all joined links.

A typical example for a material flow block is the server, it has one input and output channel for entities. It has several pre-defined statistics, like number of departed entities or utilization. For every activated statistic, an information output channel is created. This channel can then be connected to a data storage block, a data visualization block or to a block that uses this information for control decisions. The

service time of the server can either be entered in a dialog or be acquired from a random number generator (RNG). If the latter is selected, an information input port is created to which a RNG-block is connected. In the RNG-block the desired random distribution can be defined.

To allow entity-based evaluations, there are blocks to write and read attributes to/from entities, like time stamps or identification numbers. Entities can be routed through a network of blocks by using switches and combiner-blocks. To stop the flow of entities there are gate-blocks, that open or close according to an input information or signal. In these blocks it can be defined whether they should listen to an information link or a control link. If an information link is chosen, it must be defined whether the gate changes its status when the information value increases, decreases or both. This method of listening to inputs is implemented in many building blocks for control and event or signal generation.

Function-call generators are blocks to generate control signals. They can be time-based (generate signals at specific times), entity-based (when an entity passed) or information-based (when information changes). The generated signals can now be used to execute function-call-subsystems. These subsystems have information input and output channels and an embedded Matlab function that transforms the inputs into outputs. The embedded Matlab function can make this transformation by itself or execute a function located in the Matlab folder, exterior to the SimEvents model file. Matlab functions are written in Matlab's own programming language, whose syntax is similar to C. A short example of a Matlab function is given in Algorithm 1.

Algorithm 1: *An example for a Matlab function*

```
function result = example(A, x)
%find lowest index of column in matrix A with a value >x
[row,column,v] = find(A>x);
tmp =  min(column);
%transpose col-vector and multiply element-wise with vector
result = transpose(A(:,tmp)) .* [1 2 3 4 5];
end
```

Functions in Matlab, as in general programming languages, take a set of input variables and produce a set of output variables. There are also scripts, which are a set of Matlab commands, but these do not have input or output variables and instead modify, create or visualize variables in the workspace. The Matlab-workspace consists of all variables the user creates and stores during a session. When using the term function, either a function that comes with Matlab or a user-written function can be meant.

In Matlab all variables are matrices of different dimension, having a specific matrix data-type. This has to be kept in mind when calling exterior Matlab functions from embedded functions. In Simulink and SimEvents variables must have a defined, unchanging dimension and they are of a different data-type than standard matrix data-type. Also some Matlab functions, like the function to generate gamma distributed random numbers, do not work in embedded functions without a special declaration. This may result in additional debugging time when functions are called in embedded functions that were developed independently of the SimEvents model.

3 Example: Hybrid Model of a Series of M/M/1 queues with limited queue capacity

To see a practical implementation of the modelling concept and how the DES can be coupled the continuous model, the hybrid model shall be presented.

The conceptual model is shown in Figure 2. The Source, Sink and Block-Timer can be seen as the environment for the actual hybrid model. When comparing the simplification to the original model, these three blocks are the same. The Block-Timer is used to simulate a bottleneck machine at the end of the line. Remember that the common method for simplification is to leave the bottleneck untouched and aggregate the line before and after to delays, and that the hybrid model is intended to enhance the quality of the delay.

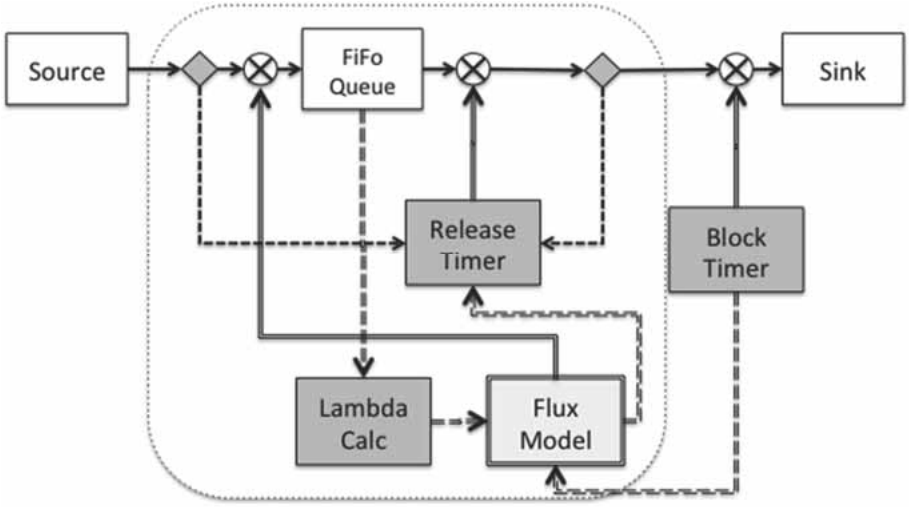


Figure 2: *The Concept Model*

The diamond shaped blocks are function-call generators, which send a signal to the Release-Timer. The generator in front of the queue is only used for the first entity entering an empty queue. The generator behind the queue signals the Release-Timer to generate a new inter-departure time and open the gate (circle with cross) at this time for one entity and let it move from the queue to the sink. Veeger et al. (2009) have shown that controlling a simple model by using state dependent inter-departure times can provide very good result quality. The Lambda-Calc block calculates the arrival rate of entities by using the number of arrivals in a specific time interval. The continuous model used here is a hyperbolic conservation law of the form $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0$, which describes the time evolution of the WIP-density ρ at the position in line x. F is the flux which is dependent on ρ and x. The flux at x=0 is the arrival rate λ and the flux at x=1 is the reciprocal value of the inter-departure time. A detailed description of this model can be found in (Armbruster et al. 2011). This continuous model, the Flux-Model, takes the arrival rate as input and generates a departure rate as output, which is used by the Release-Timer to generate a state dependent inter-

departure time. To be able to react on blockages of the Block-Timer the Flux-Model also receives information about the block status. To have a good approximation of the behaviour of the original system, the Flux-Model implements a function to block the entrance to the queue, dependent on the density at x=0.

The implementation of this conceptual model can be seen in Figure 3. 1a-b are the links to the source and sink, 2a-b are the function-call generators, 3a-b are the gates, 4 is the FiFo Queue, 5a-c is the Release-Timer, 6 is the Lambda-Calc, 7 is the Flux-Model and 8a-b are the links with the information about the blocking status.

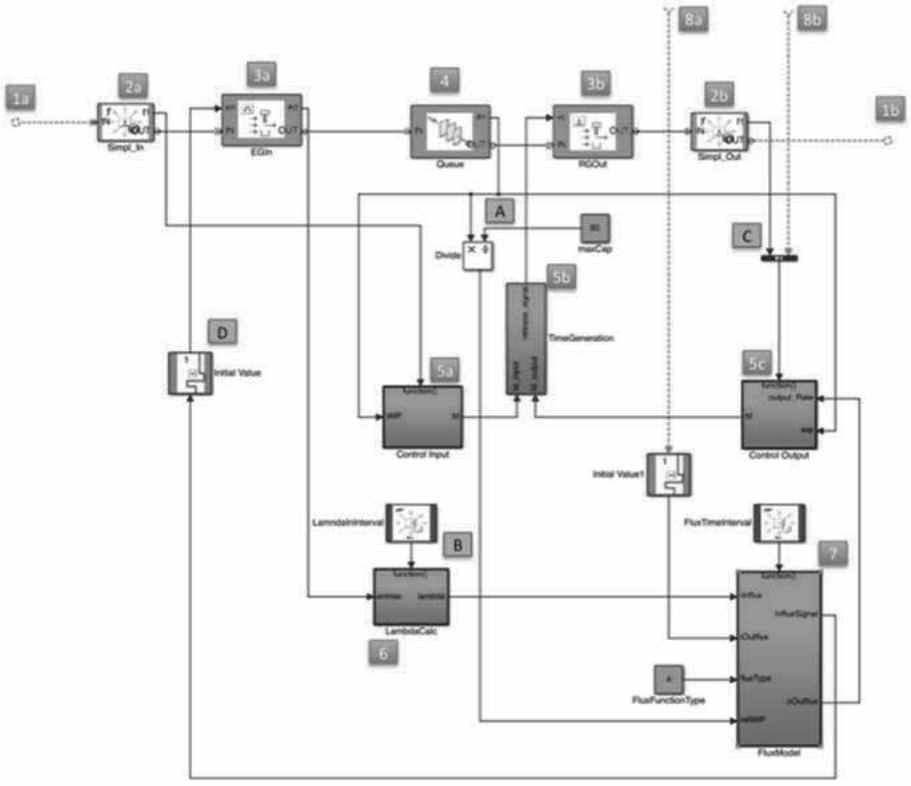


Figure 3: *Implementation of the Hybrid Control Loop*

The statistic 'Number of entities in block' in the queue is activated and at A the information is split to 5a, 5c and a Divide-block. This block calculates the relative fill-level of the queue by dividing the information of the queue with the capacity of it. This value cannot be accessed from the queue, thus a Constant-value-block is used to provide the queue capacity as output information. The relative fill level is then used as an input of the Flux-Model. At B, a time-based function-call generator triggers the Lambda-Calc block in a defined interval. At C, two control signals are joined, one signalling an entity has left the queue, the other one signalling the blockage has ended, both resulting in the generation of a new inter-departure time.

Since the output values of the Flux-Model are not defined before its first execution, the input to the gate must be set to initial value at D.

In Figure 4, the contents of the Flux-Model subsystem are shown. The function-block has 5 inputs and 3 outputs. The output oRho is used as input iRho in order to save the state of the flux model from one iteration to the next. However, since the output of a function is not defined before execution, a special memory-block has to be used to save the last output and before it can be used as an input.

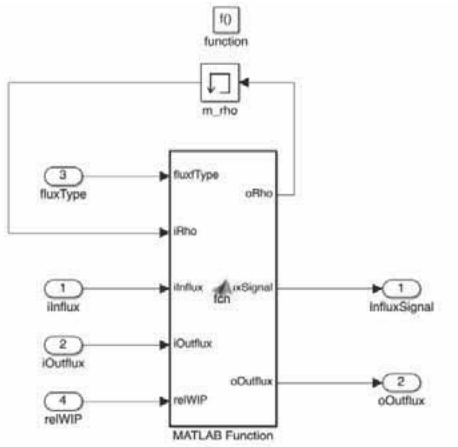


Figure 4: *Flux-Model Subsystem*

Algorithm 2 shows the content of the function-block in Figure 4. The partial differential equation of the flux model is solved using the iterative Lax-Friedrich method, implemented in the function 'Fluxmodel'. Each time the subsystem receives a function-call, Algorithm 2 is executed and with it a new iteration of the Lax-Friedrich. In each iteration, the time in the flux-model increases by a constant amount?, meaning that the function-call has to occur in a constant DES-time interval.

Algorithm 2: *Function of the Flux-Model Subsystem*

```
function [oRho, InfluxSignal, oOutflux]  = fcn(fluxfType,
iRho, iInflux, iOutflux, relWIP)
oRho = zeros(42,1);

%call the flux model
[tmp, oOutflux] = Fluxmodel(fluxfType, iRho, iInflux,
iOutflux);
oRho(:,:) = tmp(:,:);

%propablility function to close input gate
InfluxSignal = blockFunction(oRho(2));
end
```

The variable oRho in Algorithm 2 has to be defined specifically and tmp has to be used to receive the output of the function for two reasons. First, the returned vector of the function 'Fluxmodel' is not in a datatype usable in SimEvents (oOutflux is ok, since it is a single numerical value). Second, during compilation of the model, SimEvents requires that the dimension of every variable is fixed. The complier is unable to check if the dimension of a return of an external function is of fixed dimension. When assigning tmp to oRho the datatype is cast to the one of oRho. This example shows that embedded functions have to be written with special care and sometimes require seemingly unnecessary code.

The evaluation of the hybrid model is done by generating a timeline of the relative fill-level of the queue, the output rate measured at the sink and the cycle time between source and sink.

4 Experiment Execution

An important feature of simulation tools that allows efficient execution of many model scenarios is the ability to store input data external to the model file and to have an interface to access output data. In Matlab, the parameters of building blocks can be modified by a function. In Algorithm 3 the parameter 'period' of block 'FluxInterval' in Model 'HFM01' is changed to 0.4.

Algorithm 3: *Changing the parameters of building blocks in a function*

```
set_param('HFM01/FluxInterval', 'period',num2str(0.4));
copyfile('HFM01.slx', 'tmp_HFM01_1.slx');
```

After modification, the model file is copied to a temporary model-file. With this method implemented in a loop and reading data from some table in the Matlab workspace a set of model files can be generated that later can be simulated in a parallel or batch process. In Algorithm 4 a parallel execution is shown.

Algorithm 4: *Parallel execution of simulation replications*

```
parfor j = 1 : reps
%load model
load_system(modelname);
%shuffle RNG seeds
seed = mod(floor((j/reps) * now * 8640000),2^31-1);
se_randomizeseeds(modelname, 'GlobalSeed', seed);
s = rng('shuffle','twister');
%get output data
simout = sim(modelname);
wip = simout.get('wip');
wip_timevalues = [wip.time, wip.signals.values];
wipa(:,:,j) = wip_timevalues(:,1:2);
%close model
bdclose(modelname);
end;
```

By using the parfor-loop, instead of a for-loop, all j iterations of this loop are executed in parallel on the available Matlab-workers. When working on a single computer, for each CPU-core available a Matlab-worker can be started. More workers can be started over the network, if available.

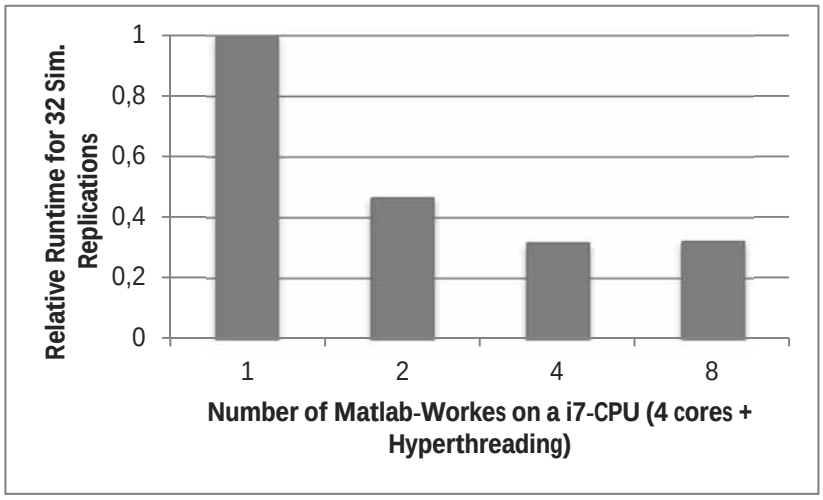


Figure 5: *Scaling of Runtime when Using Increasing Number of Workers*

In Figure 5 the scaling of the parallel execution of simulation replications is shown. The CPU used by the author has only 4 physical cores (8 with hyper-threading). The speed-up when using 2 and 4 workers is significant; using 8 workers did not improve the runtime. Since the used system has 8GB of memory and every worker allocates ca. 500-700 MB, the memory was the bottleneck and writing parts of the memory to disk increased the runtime.

In the parfor-loop the output data of each replication can be processed as necessary, but to generate data used outside the loop, data has to be written into a 'global' matrix (wipa in Algorithm 4). By using this matrix, statistical figures over all replications can be calculated after finishing the parfor-loop.

By implementing all of the above mentioned methods, calculating the mean WIP and throughput rate as timelines (matrices W ant T) of 32 replications for a certain scenario can be started like this:

Algorithm 5: *Starting a set of simulation replications*

```
[W, T] = start_Exp('HMF01', runtime, scenario_id, util, 32);
```

5 Data Analysis

Matlab comes with many potent statistical functions, making it easy to calculate means, standard deviations, minima, maxima, histograms regressions, etc. When opening matrices (aka. tables) in the workspace, several 1-click plots are available to visualize data (bar, scatter, x-y, …). When creating 3-dimensional plots, it is possible to rotate the surface and zoom in and out. When plotting data, Matlab also offers a tool to fit a function (exponential, polynomial, etc.) to the data. Since all plots and statistical analyses can be created by using the Matlab-language, this can be automated, which is especially helpful when working with many scenarios or needing to repeat slightly modified experiments. All variables in the workspace can be saved or easily exported to a spreadsheet by using copy-and-paste of selected cells.

6 Conclusion

Matlab/Simulink with the extension SimEvents was valued a very flexible modelling, simulation and analysis tool. The test platform (Version 2012b for MacOS) was very stable, although there were some usability problems with Simulink. The author developed most functions of the flux model independent of the SimEvents model; so integrating them into embedded functions was frustrating, since some 'beautiful' code had to be changed. When implementing the parallel execution of simulation replications, several problems were encountered, but the user forum offered solutions for all of them, either similar problems were already solved or questions from the author were answered within 24 hours.

Especially positive were the capabilities to utilize parallel processing, automatize the entire experimentation and analysis process, couple a DES with a general partial differential equations model and readily visualize data. The author does not want to imply that he used the most efficient functions available in Matlab for this problem, many powerful and helpful functions may remain to be discovered, but the author would like the reader to consider using Matlab for a new project.

Acknowledgement

This research was financially supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft grant HU1912/2-1.

References

Armbruster, D; Göttlich, S.; Herty, M.: A Scalar Conservation Law with Discontinuous Flux for Supply Chains with Finite Buffers, SIAM Journal on Applied Mathematics, 2011, 71, 1070-1087.

Huber, D.; Dangelmaier, W.: Controlled Simplification of Material Flow Simulation Models. In: Rossetti, M. D.; Hill, R. R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls, R. G. (Ed.), Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009, 839-850.

Johnson, R. T.; Fowler, J. W.; Mackulak, G. T.: A Discrete Event Simulation Model Simplification Technique. In: Kuhl, M. E.; Steiger, N. M.; Armstrong, F. B.;

Joines, J. A. (Ed.), Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005, 2172-2176.

Veeger, C.; Etman, P.; Rooda, J.; van Herk, J.: Cycle Time Distributions of Semiconductor Workstations using Aggregate Modeling. In: Rossetti, M. D.; Hill, R. R.; Johansson, B.; Dunkin, A. & Ingalls, R. G. (Ed.), Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009, 1610-1621.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Leistungsbewertung von Fertigungssystemen durch normierte Betriebskennlinien

Performance Evaluation of Manufacturing Systems by Normalised Operating Curves

Gerald Weigert, TU Dresden, Dresden (Germany), gerald.weigert@tu-dresden.de

Abstract: Besides common key performance indicators mainly so called operating curves are used to assess the performance of manufacturing systems. The advantage of the operating curves is that one can study the system behaviour under varying conditions. However, the systems cannot be compared with each other so easily. To ensure the comparability of the system behaviour the operating curves must therefore be normalised. On the example of a simple simulation model a method will be introduced, to get normalised operating curves. This method is also suitable for more complex or real manufacturing systems.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Fertigungssystems ist ein zentrales Anliegen sowohl bei der Fertigungsplanung und –steuerung als auch bei der Simulation und Optimierung von Fertigungsprozessen. Häufig werden zur Bewertung spezielle Kenngrößen herangezogen. Während aber diese Kenngrößen meist nur eine Bewertung im ausgewählten Arbeitspunkt zulassen, spiegeln Betriebskennlinien das Verhalten des Systems unter unterschiedlichen Bedingungen wider und sind daher für die Optimierung der Fertigungssysteme besser geeignet. Im Unterschied zu den einfachen Kenngrößen, die man auch im laufenden Fertigungsprozess messen kann, lassen sich vollständige Betriebskennlinien nur anhand von Simulationsmodellen ermitteln, da sich Experimente im realen System aus wirtschaftlichen Gründen verbieten.

Es gibt aber noch einen weiteren Grund, weshalb die Kennlinientheorie so eng mit der Simulation verbunden ist. Der Vergleich von Fertigungssystemen ist dann besonders leicht, wenn sich deren Betriebskennlinien einfach übereinander legen lassen. Das ist aber nur dann zulässig, wenn die Koordinaten-Achsen verschiedener Systeme nicht nur bedeutungsgleich sondern auch wertgleich sind. Der Weg dorthin führt über die Normierung der Kennlinien. Die Bezugswerte, auf die sich die

Normierung bezieht, können aber in den meisten Fällen nur durch Simulationsmethoden bestimmt werden.

1.2 Literaturüberblick

Wiendahl (1997) definierte Betriebskennlinien im Zusammenhang mit seinem Trichtermodell (s. Abb. 1). Hier werden die drei logistischen Grundgrößen Bestand n, Durchsatz λ (bezeichnet als Leistung) und Verweilzeit Δt (bezeichnet als Reichweite) zueinander in Beziehung gesetzt. In der von Wiendahl vorgeschlagenen Version wird der Bestand als unabhängige Variable angenommen, von der der Durchsatz (gestrichelte Kurve) bzw. die Verweilzeit (durchgezogene Kurve) abhängig sind. Beide Kennlinien werden gewöhnlich in ein gemeinsames Diagramm eingetragen, aus dem sich ablesen lässt, bei welchem Bestand das Fertigungssystem annähernd optimal arbeitet, d.h., einen möglichst hohen Durchsatz bei möglichst kurzer Verweilzeit besitzt (s. Abb. 1, markierter Bereich).

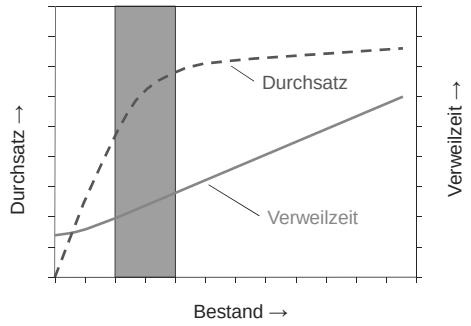


Abbildung 1: *Betriebskennlinien nach Wiendahl und Nyhuis*

Meier (2011) verwendet in seinem Online-Beitrag Kennlinien, die den funktionalen Zusammenhang zwischen Flussfaktor und Durchsatz (bezeichnet als Ausbringung) darstellen. Der entscheidende Vorteil: der Flussfaktor als Quotient von reiner Prozesszeit Δt_P und der Verweilzeit Δt ist bereits eine in der Produktionswissenschaft allgemein eingeführte Normierungsgröße für die Verweilzeit. Das Ziel, die Leistung unterschiedlicher Fertigungssysteme durch einfaches Übereinanderlegen ihrer Betriebskennlinien vergleichen zu können, wurde aber trotzdem nicht erreicht, wie folgendes Zitat beweist: „Ist es nun das Ziel, Produktionslinien untereinander zu vergleichen, so sind also die drei Kennzahlen Nutzfaktor, Flussfaktor und Ausbringung eigentlich nur dann vergleichbar, wenn auch die äußeren Rahmenbedingungen identisch sind. Dies ist jedoch eine höchst unrealistische Prämisse.“ Hier stört vor allem, dass für die unabhängige Variable der in Stück pro Tag gemessene Durchsatz herangezogen wird. Hoch getaktete Systeme haben dann natürlich andere Kennlinien als niedrig getaktete.

Fayed und Dunnigan (2007) beschäftigen sich mit der Bewertung von Halbleiter Fabs und stützen sich dabei auf den Zusammenhang von Verweilzeit (Cycle Time) in Abhängigkeit vom relativen Durchsatz, ausgedrückt durch den Quotienten aus absolutem Durchsatz und maximalem Durchsatz. Die unabhängige Variable bringt

sehr gut die relative Belastung des Systems zum Ausdruck und entspricht dem Verkehrswert in der Bedienungstheorie.

Der optimale Arbeitspunkt eines Fertigungssystems liegt dort, wo der Durchsatz bereits hoch, die Verweilzeit aber noch niedrig ist. Wiendahl bestimmt auf diese Weise einen optimalen Bestand im System (bestandsorientierte Steuerung), der in Abbildung 1 in dem grau gekennzeichneten Bereich liegt. Die Kennlinientheorie wurde später von Wiendahl gemeinsam mit Nyhuis weiterentwickelt, allerdings spielt dort die Simulation eher eine untergeordnete Rolle und dient insbesondere der Modell-Evaluation (siehe Nyhuis und Wiendahl 2006, 2012).

Fayed und Dunnigan gehen bei der Bestimmung des optimalen Arbeitspunkts einen anderen Weg. Sie leiten zu diesem Zweck aus ihrer Betriebskennlinie eine sekundäre Kennlinie ab, indem sie das Verhältnis von Durchsatz und Verweilzeit in Abhängigkeit vom relativen Durchsatz darstellen. Diese Kennlinie hat genau dort, wo ein relativ hoher Durchsatz mit einer relativ kurzen Verweilzeit zusammentreffen ein Maximum, aus dem dann der optimale Durchsatz abgeleitet werden kann.

Keines der drei vorgestellten Konzepte verwenden andere Kenngrößen als die eingangs eingeführten logistischen Grundgrößen Durchsatz, Bestand und Verweildauer. Die Konzepte unterscheiden sich jedoch in der Wahl der unabhängigen (Steuer-) Variablen ebenso wie im Grad der Normierung. Wiendahl verfolgt einen bestandsorientierten Steuerungsansatz und verwendet praktisch keine Normierung. Die beiden anderen Ansätze orientieren sich bei der Steuerung am Durchsatz, man könnte auch von einem leistungsorientierten Steuerungsansatz sprechen. Während Meier sich auf die Normierung der abhängigen Variable (Verweilzeit → Flussfaktor) beschränkt, verfahren Fayed und Dunnigan genau umgekehrt (Durchsatz → Verkehrswert). Lediglich bei der Diskussion des Einflusses der Variabilität (Hockeystock-Effekt) verwenden die beiden letztgenannten Autoren eine doppelt normierte Darstellung, indem sie den Flussfaktor in Abhängigkeit vom Verkehrswert (relativer Durchsatz) abbilden.

Für die Leistungsbewertung von Fertigungssystemen stellen sich damit folgende wichtige Fragen:

1. Wie viele bzw. welche Kennlinien werden benötigt?
2. Über welche Kenngröße wird das System gesteuert (unabhängige Variable)?
3. Wie lassen sich geeignete Bezugswerte für die Normierung ermitteln?

2 Betriebskennlinien und das Gesetz von Little

Auf die erste Frage, wie viele Kennlinien prinzipiell notwendig sind, um ein Fertigungssystem vollständig zu charakterisieren, gibt das Gesetz von Little eine eindeutige Antwort (s. Gl. 1). Little (1961) konnte die Allgemeingültigkeit eines einfachen Zusammenhangs zwischen den drei logistischen Grundgrößen Bestand, Durchsatz und Verweildauer für alle Bedienungssysteme beweisen.

$$n = \lambda \cdot \Delta t \tag{1}$$

Gleichung 1 definiert eine Sattelfläche in einem dreidimensionalen Koordinatensystem, in die alle Kennlinien eingebettet sein müssen (s. Abb. 2, rechts außen). Eine solche dreidimensionale Kennlinie kann anschließend aus

unterschiedlicher Perspektive betrachtet und in zweidimensionale Diagramme übertragen werden. Abbildung 2 zeigt die beiden möglichen Diagramme aus der bestandsorientierten Perspektive (a) und der durchsatzorientierte Perspektive (b). Jede der vier Kennlinien charakterisiert das Fertigungssystem vollständig, da sich aus zwei gegebenen Kenngrößen stets die dritte eindeutig bestimmen lässt. Die von Wiendahl vorgeschlagene Darstellung von zwei Kennlinien mag zwar anschaulich und praktisch sinnvoll sein, eine mathematisch begründete Notwendigkeit dafür besteht aber nicht.

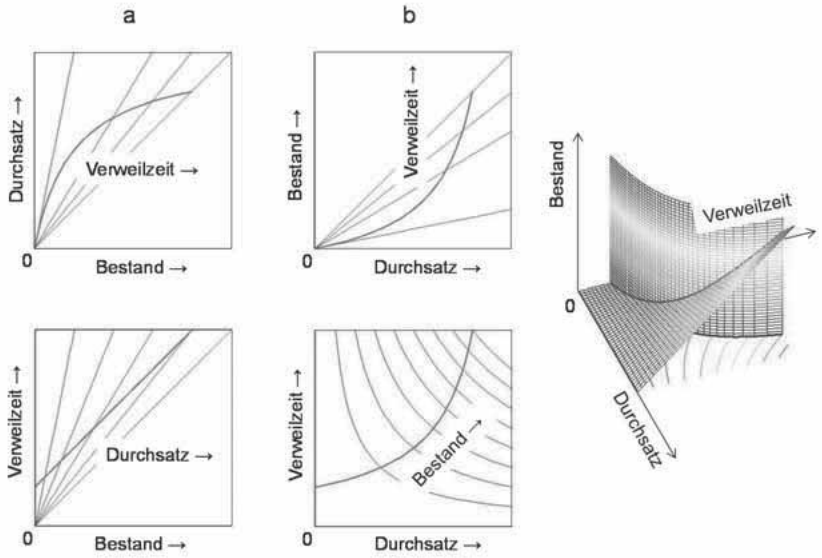


Abbildung 2: *Das Gesetz von Little und die Definition von Betriebskennlinien*

Die zweite Frage stellt sich bezüglich der Wahl der Steuervariablen. Hierauf lässt sich keine eindeutige Antwort geben, da prinzipiell jede der drei logistischen Basisgrößen als Steuervariable geeignet ist. Die Entscheidung, im Folgenden ausschließlich auf die Verweilzeit (abhängige Variable) in Abhängigkeit vom Durchsatz (unabhängige Steuervariable) als Betriebskennlinie zu setzen (s. Abb. 2b, unteres Diagramm), ist also aus mathematischer Sicht willkürlich.

Für die Normierung von Kennlinien ist diese Entscheidung jedoch durchaus sinnvoll, da man bei der Wahl der Bezugswerte auf die bereits etablierten Begriffe Flussfaktor und Verkehrswert zurückgreifen kann. Der Flussfaktor F (s. Gl. 2) ist der Quotient aus Verweilzeit Δt und der reinen Prozesszeit Δt_P und ist, wie gefordert, eine dimensionslose Größe. Da die Verweilzeit nicht kleiner werden kann als die reine Prozesszeit, ist der kleinste Wert, den der Flussfaktor annehmen kann, 1. Es sei noch angemerkt, dass in der Bedienungstheorie anstelle der reinen Prozesszeit üblicherweise deren Kehrwert, die Bedienungsrate μ verwendet wird.

$$F = \frac{\Delta t}{\Delta t_P} = \mu \cdot \Delta t \tag{2}$$

Für den Durchsatz λ bietet sich als Bezugsgröße der maximal mögliche Durchsatz λ_{max} an, der im Folgenden auch als Grenzdurchsatz bezeichnet wird. Der Quotient aus beiden wird als Verkehrswert ρ bezeichnet und gibt Auskunft über die relative Belastung des Systems (s. Gl. 3).

$$\rho = \frac{\lambda}{\lambda_{max}} \tag{3}$$

Der Verkehrswert kann nur Werte im Intervall [0,1) annehmen und ist ebenfalls dimensionslos. Die normierte Betriebskennlinie beschreibt schließlich den Zusammenhang zwischen Flussfaktor und Verkehrswert (s. Gl. 4).

$$F = f(\rho) \tag{4}$$

Während die Bestimmung der reinen Prozesszeit als Bezugsgröße für den Flussfaktor im Allgemeinen keine Schwierigkeiten bereitet, erfordert die Bestimmung des Grenzdurchsatzes als Bezugsgröße des Verkehrswertes einigen rechnerischen bzw. simulativen Aufwand, wie die folgenden Ausführungen zeigen werden.

3 Normierung von Betriebskennlinien

Die Methodik zur Bestimmung normierter Betriebskennlinien soll an einem einfachen generischen Simulationsmodell demonstriert werden (s. Abb. 3). Als Simulationssystem kam der MODELLER von simcron zum Einsatz. Das Modell besteht aus vier Stationen, bestehend je aus einer Maschine und einer Warteschlange mit unendlicher Kapazität. Lediglich die Station im (markierten) Kern kann mehrere (Anzahl m) parallele Maschinen enthalten. Bei den Experimenten werden nur die Werte $m = 1$ und $m = 5$ verwendet, letzteres unter Annahme gleicher Bedienungsrate μ für jede Maschine. Der Kernstation vor- bzw. nachgelagert ist jeweils eine Maschine mit der Bedienungsrate μ_b bzw. μ_a. Ein zusätzlicher Rückführungszweig mit der Bedienungsrate μ_r und der Rückführungswahrscheinlichkeit P_r dient der Nachbildung von Ablaufschleifen, wie sie z.B. in der Halbleiterproduktion typisch sind. Der Kern wird als Engpass im Vorwärtszweig ausgelegt, d.h. $m\mu < \mu_b, \mu_a$. Das System befindet sich im dynamischen Gleichgewicht, wenn sich die Zugangsrate λ_{in} und die Abgangsrate λ_{out} die Waage halten. In diesem Fall gilt für den Durchsatz $\lambda = \lambda_{in} = \lambda_{out}$. Das Modell kann beliebig modifiziert oder erweitert werden. So kann die Warteschlangenkapazität begrenzt bzw. einzelne Stationen aus dem Modell entfernt werden. Die Stellen, an denen das Modell aufgetrennt werden kann, sind durch X gekennzeichnet. Berücksichtigt man nur den Kern, erhält man ein einstufiges Rumpfmodell, mit dem man Ein- bzw. Mehrmaschinenprobleme untersuchen kann. Entfernt man nur den Rückführungszweig, erhält man eine mehrstufige Fertigungslinie mit einem Engpass, der aus m (= 1…5) parallelen Maschinen besteht. Die beiden Stationen vor und nach dem Engpass stehen stellvertretend für den gesamten Rest der Fertigungslinie.

In jedem Simulationslauf werden 200.000 Forderungen erzeugt und bearbeitet. Um nichtstationäre Abschnitte zu Beginn und am Ende auszuschließen, werden zur Messung der Kenngrößen jedoch nur 100.000 (50.001 … 150.000) Forderungen berücksichtigt. Es wird Ergodizität vorausgesetzt, so dass ein einzelner

Simulationslauf für die Untersuchungen ausreicht. Die Anzahl von 100.000 Forderungen ist ein Kompromiss zwischen dem Anspruch nach statistischer Absicherung der Ergebnisse und der Simulationsdauer, der für den hier verfolgten Zweck völlig ausreichend ist. Die größte beobachtete relative Abweichung zwischen ein- und ausgehenden Forderungen innerhalb des Messintervalls betrug 0,07%, war meistens aber viel kleiner.

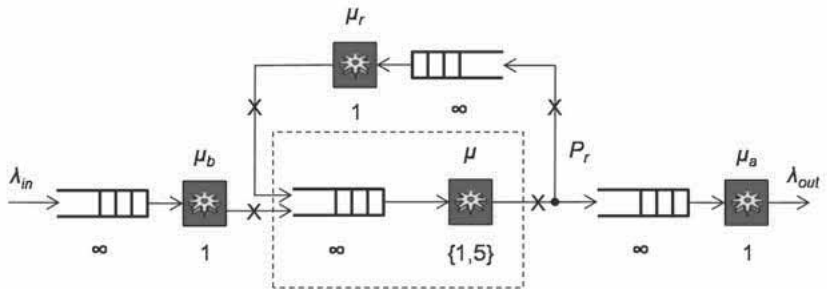


Abbildung 3: *Generisches Simulationsmodell mit markiertem Engpass*

Der Grenzdurchsatz λ_{max} wird am Ausgang des Systems gemessen. Dazu wird das System in einem vorbereitenden Simulationslauf zunächst stark überlastet, etwa durch gleichzeitiges Bereitstellen aller Forderungen, und anschließend die Zeitdauer, die für die Bearbeitung der 100.000 Forderungen des Messintervalls erforderlich ist, bestimmt. Für einfache Systeme kann der Verkehrswert auch berechnet werden, so z.B. für das einstufige Kernsystem, sofern die Forderungen asynchron und verzögerungsfrei verarbeitet werden. Gleichung 5 gilt für den Fall, dass alle m Parallelmaschinen die gleiche Bedienungsrate μ besitzen.

$$\rho = \frac{\lambda}{m\mu} \tag{5}$$

Unter bestimmten Bedingungen (Poissonscher Eingangsstrom, exponentialverteilte Bedienungszeiten) kann die Betriebskennlinie aus den bekannten Gleichungen für ein M/M/m-System sogar berechnet werden, ohne dass eine Simulation erforderlich wäre (s. Gl. 6, Kiencke 2006).

$$F = 1 + \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{(m\rho)^{m-1}}{(1-\rho)m!\sum_{i=0}^{m-1}\frac{(m\rho)^i}{i!} + (m\rho)^m} \tag{6}$$

In Abbildung 4 sind die simulierten und berechneten Betriebskennlinien (F und F/ρ) jeweils für ein M/M/1- und ein M/M/5-System gegenübergestellt. Zur besseren Unterscheidung wird die berechnete Kennlinie als geschlossener Linienzug, die simulierte Kennlinie dagegen nur durch die aus der Simulation ermittelten diskreten Werte dargestellt. Dieses Prinzip wird auch in den folgenden Diagrammen übernommen. In Abbildung 4 zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen der Theorie und der Simulation gering sind und lediglich bei hoher Systemlast in

Erscheinung treten. Darüber hinaus wird deutlich, dass ein Mehrmaschinensystem gegenüber einem Ein-Maschinen-System bei höherer Last im Vorteil ist.

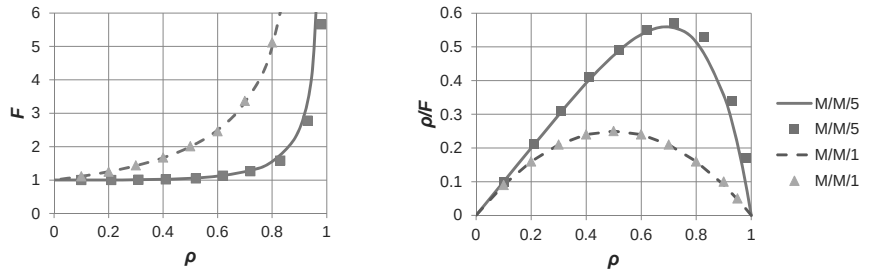


Abbildung 4: *Kennlinien eines einstufigen Systems mit m parallelen Maschinen*

Schon kleine Änderungen an den Systemeigenschaften führen dazu, dass Gleichung 6 nicht mehr gültig ist. Oft ist die Berechnung der Betriebskennlinie dann äußerst schwierig, wenn nicht gar unmöglich, so dass die Simulationsmethode dann als einziges Mittel zur Verfügung steht. Das lässt sich sehr gut am Beispiel der Gruppenbedienung zeigen. Wir gehen wieder vom einstufigen Kernsystem mit 5 parallelen Maschinen aus, führen aber die zusätzliche Bedingung einer Gruppenbedienung ein. Die Maschinen sollen die Bearbeitung aller fünf Forderungen einer Gruppe gleichzeitig und verzögerungsfrei beginnen. Die Forderungen werden auch geschlossen als Gruppe abgegeben, sofort nachdem die letzte Forderung der Gruppe fertig ist (Beginn und Ende der Bearbeitung synchronisiert). Bereits die Bestimmung des Grenzdurchsatzes λ_{max} ist hier problematisch und nur für den Fall G/D/5g rechnerisch trivial ($\lambda_{max} = m\mu$). Noch schwieriger ist die Berechnung der Betriebskennlinie, zumal man sich auch noch beliebig komplizierte Gruppenbedingungen ausdenken kann. Abbildung 5 zeigt die durch Simulation erzeugten Betriebskennlinien für drei Fälle. Hier sind die Auswirkungen steigender Variabilität bei den Bearbeitungszeiten auf den Flussfaktor erkennbar (Hockeystock-Effekt bei hoher Systemlast). Wie erwartet, steigt bei Gruppenbedienung der Flussfaktor bei sinkender Systemlast wieder an.

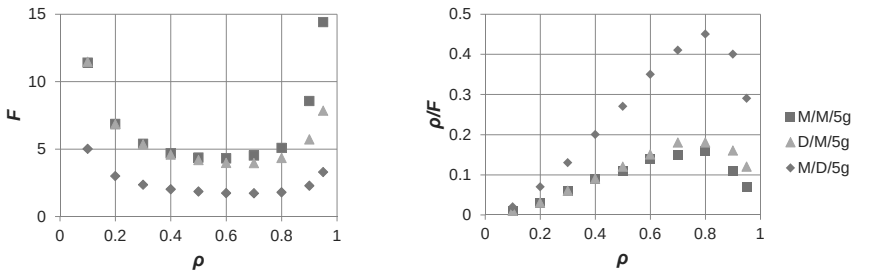


Abbildung 5: *Kennlinien eines einstufigen Systems mit Gruppenbedienung*

Das nächste Experiment bezieht sich auf eine mehrstufige Fertigungslinie (ohne Rückführungszweig bzw. $P_r = 0$). Der Grenzdurchsatz einer solchen Linie wird entscheidend durch den Engpass bestimmt: $\lambda_{max} \leq \min(\mu_b, m\mu, \mu_a)$. Indem μ_b und μ_a stets größer als $m\mu$ eingestellt werden, wird der Kern zum Engpass gemacht. Für den Fall, dass alle Bearbeitungszeiten determiniert sind, gilt $\lambda_{max} = m\mu$. Stochastische Bearbeitungszeiten lassen den Grenzdurchsatz des Systems infolge zufällig auftretender Flussabrisse dagegen zu geringeren Werten tendieren. Der Wert $m\mu$ kann daher als obere Schranke für den Grenzdurchsatz eines G/G/m-Systems angesehen werden. Dieser Effekt sollte sich bei exponentialverteilten Bedienungs- und Ankunftszeiten besonders ausprägen, insbesondere dann, wenn sich die Bedienungsraten zwischen Engpass und den restlichen Maschinen der Linie nur wenig voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund wurden deren Bedienungsraten nur um 10% gegenüber der Bedienungsrate des Engpasses erhöht: $\mu_b = \mu_a = 1{,}1 \cdot m\mu$. Dennoch konnten bei Messungen am M/M/m-System keine signifikanten Abweichungen registriert werden, so dass die obere Schranke des Grenzdurchsatzes als Bezugswert verwendet wurde. Es sei noch angemerkt, dass die vor- und nachgelagerten Maschinen ebenfalls M/M/1-Systeme sind. Abbildung 6 zeigt die simulierten Werte der Betriebskennlinie sowohl für ein M/M/1- als auch für ein M/M/5-System. Zum Vergleich sind die berechneten Kennlinien des einstufigen Modells aus Abbildung 4 eingezeichnet. Man erkennt, dass z.B. der Flussfaktor der M/M/5-Fertigungslinie im mittleren Lastbereich gegenüber dem einstufigen System deutlich erhöht ist. Diese Abweichungen sind, im Unterschied zu Abbildung 4, nicht durch statistische Effekte verursacht, sondern sind systematischer Natur.

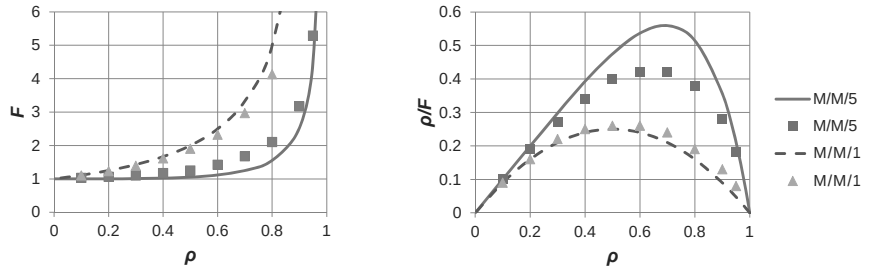


Abbildung 6: *Kennlinien einer mehrstufigen Fertigungslinie*

Für das letzte Experiment wurde das komplette System, einschließlich Rückführung ($P_r = 0{,}5$), verwendet. Der Kern wurde auf eine Einzelmaschine reduziert. Es ist charakteristisch für dieses Modell, dass die wirksamen Bedienungsraten des Engpasses und der Rückführung auch von der Wahrscheinlichkeit P_r abhängen. Sauer (2006) benutzte so genannte Erzeugnisflussgraphen, um komplexe Fertigungsabläufe abzubilden und führte den Intensitätskoeffizienten c ein, der angibt, wie oft ein bestimmter Zweig des Graphen im Mittel von einer Forderung beansprucht wird. Jeder Zweig des Graphen steht hier für eine Station, bestehend aus Warteschlange und Maschine. Für eine einfache Fertigungsschleife ergeben sich bei $P_r = 0{,}5$ die Intensitätskoeffizienten $c_v = 2$ für den Vorwärtszweig und $c_r = 0{,}5$

für den Rückwärtszeig gemäß Gleichung 7. D.h., die Forderungen durchlaufen den Engpass im Durchschnitt zweimal. Da die vor- und nachgelagert Maschine nur jeweils genau einmal von einer Forderung beansprucht wird (beim Ein- bzw. Austritt aus dem System), gilt für $c_b = c_a = 1$. Die Rückführung wird im Durchschnitt nur von jeder zweiten Forderung durchlaufen, wobei es Forderungen geben kann, die gar nicht oder solche die mehrfach zurückgeschickt werden. Es existieren verschiedene Methoden zur Umwandlung der Struktur des Graphen sowie zur Berechnung der Intensitätskoeffizienten, auf die an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen werden kann (siehe auch Weigert 2013).

$$\begin{aligned} c_v &= 1/(1-P_r) \\ c_r &= P_r \cdot c_v \end{aligned} \tag{7}$$

Die wirksame Bedienungsrate μ' eines jeden Zweiges ergibt sich aus dem Quotienten μ/c. Konkret bedeutet das für die wirksamen Bedienungsraten im Vorwärts- und Rückwärtszweig: $\mu'_v = \mu' = 0{,}5 \cdot \mu$ und $\mu'_r = 2 \cdot \mu_r$. Der Engpass kann, in Analogie zur einfachen Fertigungslinie, durch Vergleich der Bedienungsraten aller Zweige bestimmt werden, diesmal jedoch unter Verwendung der wirksamen Werte für die Bedienungsraten. Die Methode kann auf beliebig komplexe Graphen angewendet werden, um einen geeigneten Bezugswert für den Grenzdurchsatz zu bestimmen. Allerdings gilt auch hier, der so berechnete Wert ist streng genommen nur eine obere Schranke für den Grenzdurchsatz. Der eigentliche Wert muss durch Simulation bestätigt werden.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse von vier Simulationsexperimenten mit dem vollständigen Modell. Die Bearbeitungszeiten aller Maschinen sind determiniert. Es gilt $\mu_b = \mu_a = 1{,}1 \cdot \mu'$ und $\mu'_r = 4 \cdot \mu'$. Der Wert für den Grenzdurchsatz $\lambda_{max} = \mu'$ konnte unter diesen Bedingungen bestätigt werden. Für die Betriebskennlinie M/D wurde ein Poissonscher und für D/D ein determinierter Eingangsstrom verwendet. Es muss angemerkt werden, dass auch die Kennlinie D/D aufgrund der stochastischen Rückverzweigung kein determiniertes System beschreibt. Die Kendall-Notation lässt sich auf diese Art von System nicht mehr korrekt anwenden. Man erkennt auch hier wieder den Einfluss der Variabilität (des Eingangsstroms) auf den Flussfaktor.

Nach Sauer et al. (2006) lässt sich die reine Prozesszeit (Verweilzeit nach Abzug der Wartezeiten) im System als Summe der Prozesszeiten aller Zweige des Graphen, gewichtet mit den zugehörigen Intensitätskoeffizienten berechnen. Daher liegt es nahe, ein gegebenes System auch im Layout in eine Fertigungslinie umzuwandeln. Wie bereits gezeigt, kann auf diese Weise zwar der Engpass bestimmt und der Grenzdurchsatz abgeschätzt werden, die Kennlinien der zugehörigen Fertigungslinie unterscheiden sich jedoch deutlich von der des ursprünglichen Systems, wie die mit dem Zusatz „Linie“ gekennzeichneten Kennlinien beweisen. Besonders deutlich wird der Unterschied im Fall D/D.

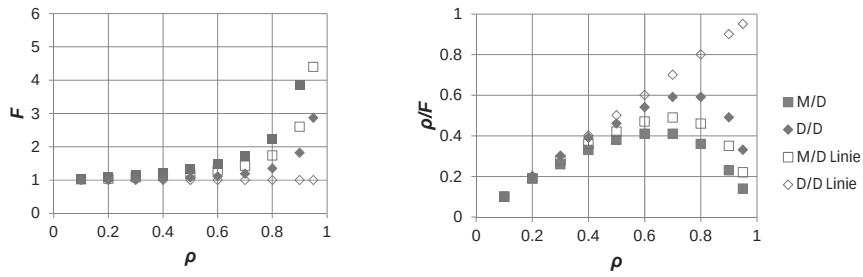


Abbildung 7: *Kennlinien eines mehrstufigen Systems mit Rückführung*

4 Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel eines einfachen Simulationsmodells konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, Betriebskennlinien so zu normieren, dass sie praktisch „übereinander gelegt" werden könnten. Das ist von großem Vorteil, wenn man unterschiedliche Fertigungssysteme direkt miteinander vergleichen will. Die Bestimmung einer Kennlinie mittels Simulation ist an sich kein Problem, gehört vielmehr zum Handwerk in den Produktionswissenschaften. Die Normierung dagegen erweist sich als die größere Herausforderung. Der Grenzdurchsatz λ_{max} als Bezugswert für den Verkehrswert kann in den meisten Fällen nur durch Simulationsmethoden bestimmt werden. Oft kann man jedoch auch analytische Methoden nutzen, um durch Berechnung von geeigneten Schrankenwerten die Simulation zu unterstützen; manchmal gelingt es sogar, den Bezugswert direkt zu berechnen.

Das untersuchte Beispielmodell weist wesentliche Merkmale eines realen Fertigungssystems auf, ohne natürlich die Größenordnung oder Komplexität realer Systeme zu erreichen. Die Methodik allerdings ist universell und unabhängig von der Systemgröße. Sie lässt sich genauso gut auf eine Fabrik als auf eine einzelne Maschine oder Maschinengruppe anwenden. Dennoch konnte nicht auf alle Probleme eingegangen werden. Welchen Einfluss bereits eine kleine Änderung bei der Steuerung haben kann, zeigt das Beispiel der Gruppenbedienung. Es gibt unzählige, mitunter hochkomplexe Steuerregeln, die jedes Mal hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Bezugswert genau analysiert werden müssen. Blockierungen oder Verlustströme wurden ebenfalls ausgespart und sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Literatur

Fayed, A.; Dunnigan, B.: Characterizing the Operating Curve – How Can Semiconductor Fabs Grade Themselves? International Symposium on Semiconductor Manufacturing. Santa Clara 15.-17. Oktober 2007, S. 1-4.

Kiencke, U.: Ereignisdiskrete Systeme – Modellierung und Steuerung verteilter Systeme. München, Wien: Oldenbourg 2006.

Little, J. D. C.: A proof for the queuing formula: L = λ W, Operations Research. 9 (1961), S. 383–387.

Meier, K.-J.: Kennzahlen von Produktionskennlinien vergleichbar machen. Institut für Produktionsmanagement & Logistik, IPL-Magazin: 15 | Mai 2011. http://www.ipl-mag.de/scm-daten/194-scm-daten-15 (gefunden 28.3.2013).

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistic Production Operating Curves – Basic Model of the Theory of Logistic Operating Curves. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55 (2006) 1, S. 441-444.

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York, Hong Kong, London, Mailand: Springer Vieweg 2012.

Sauer, W.; Oppermann, M.; Weigert, G.; Werner, S.; Wohlrabe, H.; Wolter, K.-J.; Zerna, T.: Electronics Process Technology – Production Modelling, Simulation and Optimisation. London: Springer 2006.

Weigert, G.: Operating Curves of Manufacturing Systems – A Theoretical Discourse. International Conference on Flexible and Intelligent Manufacturing. Porto 26.-28. Juni 2013, S. 887-898.

Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung – Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf der Basis des Trichtermodells. München, Wien: Hanser 1997.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Ressourcenverteilung in mesoskopischen Simulationsmodellen für Produktions- und Logistiknetzwerke

Resource allocation in mesoscopic simulation models of production and logistics networks

Til Hennies, Tobias Reggelin, Juri Tolujew, Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF und Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg (Germany), til.hennies@iff.fraunhofer.de, tobias.reggelin@iff.fraunhofer.de, juri.tolujew@iff.fraunhofer.de

Abstract: Effective resource allocation in logistics networks highly affects the system's performance and must therefore take into consideration the multitude of different objectives, the heterogeneity of resources and jobs and the dynamically changing system states and resource attributes. Simulation of these strategies is a powerful way in order to test, analyze and evaluate different strategies. This paper provides a classification of resources and jobs within supply chains, the definition and mesoscopic formalization of possible resource allocation strategies and combinations of these and its application to a four stage supply chain.

1 Einleitung

Die Ressourcenverteilung ist in den Bereichen Produktion und Logistik von essentieller Bedeutung, da sie maßgeblich die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems bestimmt. Zielstellungen an effektive Ressourcenverteilstrategien sind multivariat und beinhalten die Reduktion von Durchlaufzeiten und Wartezeiten der Flussobjekte, eine Maximierung des Durchsatzes und die Minimierung der Nutzungsgradamplitude verschiedener Ressourcen. Effektives Ressourcenmanagement übersetzt sich direkt auch in ein besseres Prozessmanagement und damit eine Qualitätssteigerung für den Kunden. Im Hinblick auf die Zielkriterien ist auch eines der Hauptziele der Prozesssimulation, bestmögliche Strategien der Ressourcenverteilung zu ermitteln und den Ressourceneinsatz entsprechend zu planen und steuern. Unter Berücksichtigung der Heterogenität von Ressourcen sowie Aufträgen, inhärenter Bedingungen an den Ressourceneinsatz und dynamisch veränderlicher Attribute ist die Modellierung von Ressourcenverteilstrategien eine nicht-triviale Aufgabe.

2 Ressourcen und Aufträge in logistischen Netzwerken

In globalen, interdependenten logistischen Netzwerken gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ressourcen und Aufträge, die für ein leistungsfähiges System durch eine effektive Allokationsstrategie gesteuert werden müssen. Aufgrund der Komplexität von Ressourcen und Aufträgen ist diese Entscheidung kompliziert und muss auf Grundlage einer Analyse der vorhandenen Ressourcen und Aufträge, Zielstellungen und Prioritäten basieren. Der Begriff *Ressource* beschreibt die Gesamtheit aller Produktions- und Logistikmittel und –dienstleistungen, welche sich in materielle und immaterielle gruppieren lassen. (Schuster 2012) Diese Einteilung ist allerdings zu grob für die Vielzahl in logistischen Netzwerken eingesetzter Ressourcen. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Ressourcenarten bedingen die Einsatzfelder und möglichen Allokationen, weshalb eine präzise Klassifikation auf Grundlage aller relevanten Ressourceneigenschaften notwendige Bedingung ist. Eine Übersicht dieser Eigenschaften und zugehöriger Ausprägungen liefert die Tabelle 1.

Tabelle 1: *Morphologie von Ressourceneigenschaften*

Attribut	Ausprägungsformen		
Erscheinungsform	Physisch/materiell	Virtuell/immateriell	
Mobilität	Stationär	Beweglich	Ortsunabhängig
Flexibilität	Auftragsspezifisch	Universell	
Autonomie	Aktiv	Passiv	
Verfügbarkeit	Vollständig	Teilweise	
Kosten	Niedrig	Mittel	Hoch
Automatisierungsgrad	Computerisiert	Halb-autonom	Menschlich
Eigentum	Intern	Extern	
Erneuerbarkeit	Vollständig	Teilweise	Nicht
Lebensdauer	Kurzfristig	Mittelfristig	Langfristig
Ersetzbarkeit	Vollständig	Teilweise	Nicht
Kondition	Technisch	Organisatorisch	

In ähnlicher Art und Weise hat auch der Begriff *Aufträge* anwendungsspezifische und kontextabhängige Definitionen. Aufträge sind allgemein Geschäftsobjekte, welche bestätigte Anfragen des Kaufens, Verkaufens, Auslieferns oder Empfangens von Waren enthalten. (Schönsleben 2011) Aufträge decken damit alle Aufgaben innerhalb des Fulfillment-Prozesses von der Kundenanfrage bis zur Belieferung ab, die Ressourcen und Zeit für die Ausführung erfordern. Diese allgemeine Definition von Aufträgen in logistischen Netzwerken impliziert sehr unterschiedliche Eigenschaften dieser in verschiedenen Dimensionen. Die Eigenschaften mit möglichen Ausprägungsformen sind in dem morphologischen Kasten der Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: *Morphologie von Auftragseigenschaften*

Attribut	Ausprägungsformen			
Produktions-strategie	Make-to-stock	Make-to-order	Engineer-to-order	Assemble-to-order
Komplexität	Standardauftrag		Kundenspezifischer Auftrag	
Flexibilität	Ressourcenspezifisch		Universell	
Stichtags-Variabilität	Keine	Niedrig		Hoch
Losgröße	Einzelstück	Kleinserie	Massen-produktion	Ohne Lose
Vorhersagbarkeit	Ad hoc		Regelmäßig	
Priorität	Eilauftrag	Standardlieferzeit		Fester Liefertermin
Wiederholungs-rate	Keine	Selten		Regelmäßig
Auslöser	Nachfrage	Forecast		Verbrauch
Auftragswert	Gering	Mittel		Hoch

Die beschriebene Komplexität von Aufträgen und Ressourcen in logistischen Netzwerken hat ein großes Spektrum unterschiedlicher Situationen und Szenarien zur Folge, in denen Ressourcenallokationsstrategien ausgewählt und implementiert werden müssen. Die sich ergebenden Szenarien determinieren die möglichen Ressourcenverteilstrategien. Mögliche Zielkriterien beinhalten dabei eine Wartezeitenminimierung, Durchlaufzeitenminimierung, Minimierung der Ressourcenbewegungen, Minimierung der Ressourcennutzungsgradamplitude, Maximierung des Durchsatzes, Maximierung der Nutzungsraten oder eine Maximierung der Liefertreue.

3 Modellierung von Ressourcenverteilstrategien

Bei der Modellierung von Ressourcenverteilstrategien kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen *state-based* und *model-based* Strategien. Während *state-based* Allokationen einer Momentaufnahme des Systemzustandes zugrunde liegen und sich damit dynamisch anpassen, basieren *model-based* Allokationen auf der anfänglichen Vorhersage zukünftiger Systemzustände durch das Modell selbst. Weiterhin wird unterschieden zwischen *präemptiv* bzw. *nicht-präemptiv* Strategien, bei denen Aufgaben nach Bearbeitungsbeginn die Ressource noch wechseln können bzw. nicht. (Gomoluch und Schroeder 2003) Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zu Ressourcenallokationsstrategien befasst sich auch mit der Entwicklung agenten-basierter oder markt-orientierter Ressourcenverteilungen, bei der Klienten dezentral und lokal über die Inanspruchnahme sowie Bereitstellung von Ressourcen entscheiden. (Kelton et al. 2010; Abramson et al. 2002; Chavez et al. 1997; Kakhbod 2013)

Der in der Produktion und Logistik weitverbreitete ereignisdiskrete Simulationsansatz setzt Ressourcenverteilstrategien über Algorithmen und die Prüfung logischer

Bedingungen um. Die klassischen Ressourcenverteilstrategien sind bei der Disposition Verfahren wie *Round-Robin*, *Weighted Round-Robin*, *First-In-First-Out*, *First-In-Last-Out* oder *Fixed Priority*. Bei der diskreten Simulation wird zu den Zeitpunkten der Ereignisse eine algorithmische Überprüfung der Regeln an allen Ressourcen durchgeführt und entsprechend der Strategie die Allokation umgesetzt. Aktuelle Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet beschäftigen sich auch mit der Kombination von Simulation und Optimierung. (Hubscher-Younger et al. 2012; Doleschal et al. 2012)

Die ereignisdiskrete Simulationssoftware *Tecnomatix Plant Simulation* stellt dem Nutzer für die Implementierung von Ressourcenallokationsstrategien sogenannte Ressourcenobjekte zur Verfügung, den *Broker* und den *Exporter*. Die Disposition einzelner menschlicher Ressourcen wie Werker zur Erfüllung von Aufgaben wird über den *Broker* realisiert. Der *Exporter* fasst mehrere homogene Ressourcen zu einer Gruppe zusammen, deren Gesamtkapazität zur Erfüllung von Aufgaben zur Verfügung steht, allerdings nicht individuell allokiert wird. (Siemens PLMS Inc. 2010)

In der makroskopischen System Dynamics Simulation lassen sich die Regeln der Ressourcenverteilungen auch analytisch ausdrücken und sind beispielsweise in Kim und Choi (2008) dargestellt, wo ein System Dynamics Modell für dynamische Ressourcenallokation in Service Supply Chains vorgestellt wird. Im Simulator Vensim der Firma Ventana Inc. auch als Standardlösung implementiert worden. Der Anwender kann bei diesem Simulator unter Nutzung der Funktion *Allocate by Priority* eine Ressourcenallokationsstrategie in realistischen Wettbewerbssituationen definieren (Ventana Systems Inc. 2012).

4 Ressourcenverteilung in der mesoskopischen Simulation

Das Konzept der mesoskopischen Simulation ist an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg entwickelt worden und ist im Einzelnen beschrieben in Reggelin (2011), Schenk et al. (2009) und Schenk et al. (2010).

Als Basiskomponenten werden bei der mesoskopischen Modellierung mehrkanalige Trichter zur Abbildung von Prozessen an Ressourcen verwendet. Die Trichter erlauben eine analytische Darstellung der Ressourcenallokation, da sie selbst vollständig analytisch definiert sind, jedoch ist die Thematik der Ressourcenverteilung in der mesoskopischen Simulation in bisherigen Vorarbeiten nicht explizit betrachtet worden. Zur Steuerung der Trichter und Abbildung von Ressourcenverteilungen kann in der mesoskopischen Simulation die Grenzleistung des Trichters benutzt werden (vgl. Abb. 1). Über die gleichzeitige Bearbeitung in parallelen Trichtern können auch komplexere Sachverhalte im Hinblick auf die Heterogenität der Ressourcen und Aufträge modelliert und simuliert werden.

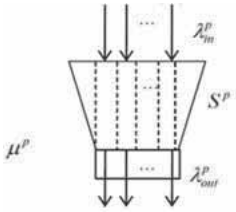


Abbildung 1: *Mehrkanaliger Trichter der mesoskopischen Simulation*

Die Grenzleistung μ *[Anzahl Aufträge/ Zeiteinheit]* eines Trichters erlaubt eine Steuerung des Outputs λ_{out} *[Anzahl Aufträge/ Zeiteinheit]*. Ist der Eingangsfluss von Produkt 1 (λ^1_{in}) größer als die Grenzleistung μ^1, baut sich ein Bestand S^1 auf. Da der Trichter über mehrere Kanäle verfügt, kann die gesamte Ressourcenkapazität, ausgedrückt durch die Grenzleistung μ, auf die unterschiedlichen Kanäle oder Auftragstypen aufgeteilt werden und so Verteilstrategien abgebildet werden. Aufträge werden dabei als Produkte interpretiert und die Gesamtheit wartender Aufträge vor einer Ressource als Bestände. Auf diesem Konzept basierend werden unterschiedliche Verteilstrategien vorgestellt, welche Prioritätsregeln umsetzen und entsprechend die Grenzleistungen steuern und aufteilen. Die mathematische Darstellung der Grenzleistung ist unmittelbar im Simulator MesoSim abbildbar. Mesoskopische Ressourcenallokationen sind zentral gesteuert, state-based und nicht-präemptiv. Im Unterschied zu System Dynamics Modellen wird bei der mesoskopischen Simulation allerdings eine neue Ressourcenverteilung nicht permanent, sondern nur bei den sogenannten Entscheidungssituationen durchgeführt, die in Verbindung mit entsprechenden Ereignissen auftreten. Im Folgenden sind unterschiedliche Strategien in ihrer Umsetzung in der mesoskopischen Simulation aufgezeigt.

Explizit: Die einfachste Lösung der Ressourcenallokation besteht in einer direkten Zuteilung, bei der eine Ressource nur einen Auftragstyp bearbeitet. Jede Ressource kann entweder als ein einzelner Trichter oder aber als ein Kanal in einem Trichter modelliert werden. Im ersten Fall entspricht die Grenzleistung für die Bearbeitung jedes Auftragstyps der Grenzleistung des Trichters: $\mu^i = \mu$. Im zweiten Fall wird die Grenzleistung des Trichters auf die unterschiedlichen Kanäle aufgeteilt.

$$\mu = \sum_{j=1}^{n} \mu^j \tag{1}$$

Diese Aufteilung repräsentiert unflexible Ressourcennutzung ohne eine Möglichkeit der Kapazitätsanpassung auf unterschiedliche Auftragstypen. Damit ist sie nur für kontinuierliche Auftragsverläufe über die Zeit geeignet. Voraussetzung ist außerdem, dass die Anzahl der Ressourcen mindestens der Anzahl unterschiedlicher Auftragstypen entspricht.

Auftragstypunabhängig: Bei dieser Strategie bearbeitet jede Ressource gleiche Proportionen unterschiedlicher Aufträge. Die Grenzleistung des Trichters ist daher in gleichen Proportionen auf die unterschiedlichen Auftragstypen verteilt.

$$\mu^i = \frac{\mu}{n} \tag{2}$$

Unabhängig von Nachfrage oder wartender Aufträge vor der Ressource bleiben die Durchsatzraten konstant über die Zeit, womit die Strategie vor allem für Situationen mit sehr konstantem und vorhersagbarem Auftragsaufkommen geeignet ist.

Ankunftsproportional: Diese Allokationsstrategie verteilt die Ressourcenkapazitäten dynamisch entsprechend der Ankunftsraten unterschiedlicher Aufträge, sodass häufig auftretende Aufträge einen entsprechend größeren Anteil der Ressourcenkapazität zur Bearbeitung erhalten. Die Grenzleistung der einzelnen Kanäle wird über die Gleichung 4 gesteuert.

$$\mu^i = \frac{\Lambda^i{}_{in}}{\sum_{j=1}^{n} \Lambda^j{}_{in}} \mu \tag{3}$$

Diese Strategie repräsentiert damit eine Push-Strategie, bei der Auftragstypen in veränderlichen und unterschiedlichen Proportionen auftreten und ausgeglichene Nutzungsraten der Ressourcen gewährleistet werden sollen, während Nachfolgeoperationen, Anfangsbestände und impulsartige Veränderungen jedoch unbeachtet bleiben.

Bestandsproportional: Bei dieser Strategie werden Aufträge den Ressourcen auf Grundlage der Proportionen wartender Aufträge zugeteilt. Es handelt sich ebenfalls um eine Push-Strategie, die Ressourcenkapazitäten auf Grundlage von wartenden Aufträgen zuteilt und somit auch impulsartige Veränderungen sowie Anfangsbestände beachtet.

Bestandsentwicklungsproportional: Bei dieser Strategie werden die Ressourcenkapazitäten so auf unterschiedliche Auftragstypen aufgeteilt, dass proportionale Bestandsverläufe wartender Aufträge gewährleistet werden. Diese Strategie erzeugt parallele Verläufe der Bestände vor einer Ressource. Bei unzureichender Ressourcenkapazität und gleich wichtigen Auftragstypen von beispielsweise zwei Kunden ist diese Strategie sicher die „gerechteste“, da sie gleiche Outputs beider Kunden erzeugt.

Nachfrageproportional: Unterschiedliche Auftragstypen werden bei dieser Strategie entsprechend der Nachfrageproportionen zur Bearbeitung herangezogen. Endkunden generieren in diesem Fall als Senken des Modells die Nachfrage d^i nach unterschiedlichen Produkten. Entsprechend handelt es sich um eine Pull-Strategie, bei der sich die Grenzleistung der einzelnen Kanäle als

$$\mu^i = \frac{d^i}{\sum_{j=1}^{n} d^j} \mu \tag{4}$$

darstellen lässt.

In Abhängigkeit der Nachfrageveränderung über die Zeit werden die Ressourcenkapazitäten gesteuert. Ein Beispiel für die Anwendung dieser Strategie ist eine Priorisierung zweier Kunden in Lead Buyer und Follower.

Absolute Prioritäten: Bei dieser Strategie werden Ressourcenkapazitäten entsprechend definierter Auftragsprioritäten verteilt. Die Kapazitäten werden immer vollständig dem Auftragstyp mit der höchsten Priorität zugeteilt. Entsprechend entspricht die Grenzleistung des Kanals für den höchst-priorisierten Auftragstyp der Gesamt-Grenzleistung des Trichters, die aller anderen Aufträge ist null.

Relative Prioritäten: Eine relative Priorisierung der Auftragstypen wird im Vorfeld definiert und entsprechend dieser werden die Ressourcenkapazitäten auf die unterschiedlichen Aufträge im Wartebereich aufgeteilt. Wenn die relative Priorität eines Auftrags als p^i definiert ist, berechnet sich die Grenzleistung des zugehörigen Kanals als:

$$\mu^i = \frac{p^i}{\sum_{j=1}^{n} p^j} \mu \tag{5}$$

Relative Prioritäten sind äquivalent zu einer festen proportionalen Zuordnung von Ressourcenkapazitäten, die aber über die Zeit angepasst werden können. Im Unterschied zu absoluten Prioritäten werden hier unterschiedliche Auftragstypen parallel bearbeitet.

Ankunftsreihenfolge: Diese Strategie ist eine spezielle Form absoluter Prioritäten und wird hier daher nicht erneut vorgestellt. Aufgrund hoher praktischer Relevanz der FIFO oder LIFO Regeln sei sie dennoch erwähnt und ist entsprechend auch in der mesoskopischen Simulation umsetzbar.

Wartezeitenproportional: Diese Strategie gleicht Wartezeiten vor der Ressource einander an und findet beispielsweise Anwendung bei Verarbeitung verderblicher Produkte. Aufträge werden entsprechend der Liegezeiten bearbeitet und bei der Simulation so auch die Grenzleistung der Kanäle gesteuert.

Restzeitproportional: Diese Strategie priorisiert Aufträge in Abhängigkeit der Restzeiten bis zur Auslieferung zum Kunden oder die Weitergabe an das Nachfolgeelement. Ressourcenkapazitäten werden dynamisch an die Dringlichkeiten der Aufträge angepasst.

5 Anwendungsbeispiel

Das nachfolgende Beispiel ist die vereinfachte Abstraktion einer vierstufigen Lieferkette, bei der über unterschiedliche Ressourcenverteilstrategien der einzelnen Stufen eine Push-Strategie und eine Pull-Strategie des Materialflusses umgesetzt und verglichen werden.

Zwei Produkttypen werden dabei vom Lieferanten bis zum Kunden in drei Fertigungsstufen bearbeitet. Die Lieferungen vom Lieferanten unterliegen unterschiedlicher Variabilität und das Ziel ist die Befriedigung von Kundenbedürfnissen. Über Ressourcenverteilungen an den einzelnen Bearbeitungsprozessen kann die Bearbeitung der unterschiedlichen Produkttypen auf unterschiedliche Systemzustände reagieren. Um unterschiedliche Strategien miteinander vergleichen zu können, sind diese in dem gleichen Modell in zwei parallelen Strängen umgesetzt und diese unterliegen den gleichen Bedingungen mit Ausnahme der Steuerung der Grenzleistungen für die Ressourcenallokation. Die

Push-Strategie besteht aus einer Kombination der ankunfts- und bestands-proportionalen Strategien und die Einzelelemente werden in Abhängigkeit vorhergehender Prozesse gesteuert. Im Gegensatz dazu werden Elemente bei der Pull-Strategie von Nachfolgeoperationen gesteuert und die Ressourcen entsprechend der Nachfrage aufgeteilt. Die Untersuchung stellt den schnellen und einfachen Vergleich zweier grundsätzlich unterschiedlicher Strategien dar, welche durch die Ressourcenverteilung an jeder Stufe der Lieferkette umgesetzt werden. Drei Szenarien wurden erstellt und getestet, die sich in der Variabilität der Wiederbeschaffungsmenge unterscheiden und somit eine Lieferantenunsicherheit repräsentieren. Ziel der Experimente ist die Ermittlung der Auswirkungen auf die Liefertreue unter Einfluss von Lieferantenunsicherheit bei der Anwendung unterschiedlicher Ressourcenverteilstrategien. Dazu werden unter sich verändernder Variabilität der Lieferungen die Bestandsentwicklungen auf der letzte Stufe der Lieferkette vor dem Kunden betrachtet und verglichen, um Stock-out Situationen zu identifizieren, welche bei kontinuierlicher Nachfrage Lieferprobleme bedeuten. Die Diagramme in Abbildung 2 illustrieren diese Bestandsentwicklungen für zwei Produkttypen (heller und dunkler Verlauf) als Resultat der Anwendung unterschiedlicher Ressourcenverteilstrategien in beschriebenen drei Szenarien. Das jeweils oberste Diagramm zeigt die Liefermengen des Lieferanten (Ordinate) am Anfang der Lieferkette über die Zeit (Abszisse). Das mittlere Diagramm zeigt jeweils die Bestandsentwicklung (Ordinate) unter Anwendung der beschriebenen Push-Strategie über die Zeit (Abszisse) und das untere Diagramm analog unter Anwendung der Pull-Strategie.

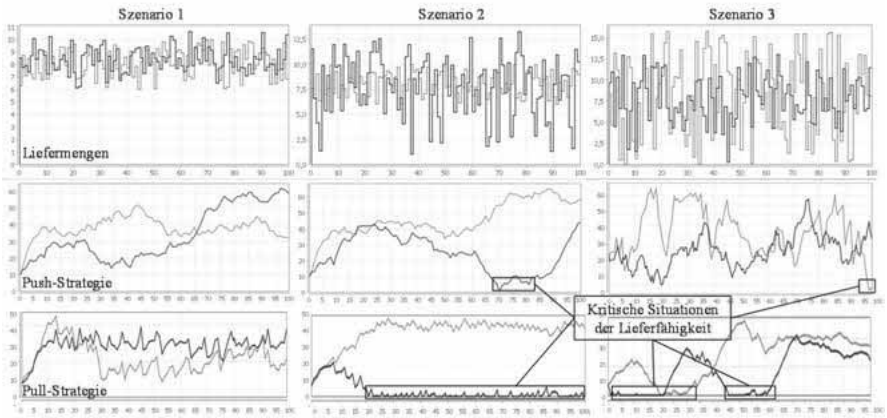


Abbildung 2: *Liefermengen und Bestandsentwicklungen bei unterschiedlicher Variabilität der Wiederbeschaffungsmengen unter Push- bzw. Pull-Strategie*

Im ersten Szenario ist erkennbar, dass die Strategien der Ressourcenverteilungen zwar zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, nichtsdestotrotz aber beide in der Lage sind, die Kundenbedürfnisse über den gesamten Simulationszeitraum zu befriedigen. Im zweiten Szenario ist die Variabilität der Wiederbeschaffungsmengen für ein Produkt stark erhöht (dunkler Verlauf) während sie für das andere niedrig bleibt (heller Verlauf). Während die Push-Strategie weitestgehend in der Lage ist, die Ressourcen

entsprechend der veränderten Auftragslage anzupassen, erzeugt die Pull-Strategie regelmäßige Stock-Out-Situationen (blau hinterlegt). Die Begründung für diesen Verlauf liegt in der Ressourcenallokation, die ausschließlich an der Nachfrage orientiert ist und die jeweils aktuelle Produktverfügbarkeit nicht miteinbezieht. Daher wird nur ein Teil der verfügbaren Ressourcenkapazität genutzt. Im dritten Szenario wird die Variabilität beider Produkttypen stark erhöht. Die Pull-Strategie führt sehr schnell zu Stock-Out Situationen, die über den Großteil der Simulationszeit nicht behoben werden können. Erneut liefert die Push-Strategie die weitaus besseren Ergebnisse im Hinblick auf die Lieferfähigkeit beim Kunden. Diese Strategie passt sehr viel variabler die Kapazitäten an veränderte Liefersituationen an und umgeht so längerfristige Stock-Outs. Diese Ergebnisse implizieren einen direkten Zusammenhang der Wiederbeschaffungsvariabilität und der Vorteilhaftigkeit einer Push- oder Pull-Strategie in der Lieferkette im Hinblick auf die Ressourcenverteilung. Während die Pull-Strategie bei kontinuierlichem Wiederbeschaffungsverlauf geringer Variabilität die Lieferfähigkeit über die Simulation gewährleistet, führt bei steigender Variabilität in beschriebener Situation die Push-Strategie zu weitaus besseren Ergebnissen. Die Studie betrachtet Lieferfähigkeit als das einzige Zielkriterium und bezieht weder Kosten noch andere Ziele in die Betrachtung ein. Zudem ist nur die Variabilität von Lieferantenseite betrachtet worden, in einer umgekehrten Situation höherer Nachfragevariabilität und konstanter Wiederbeschaffung sind entsprechend auch umgekehrte Ergebnisse zu vermuten. Jedoch konnte bereits hier die einfache Implementierung unterschiedlicher Ressourcenverteilstrategien in mesoskopischen Simulationsmodellen und der Software MesoSim gezeigt werden sowie eine schnelle Anpassung und Übertragung auf mehrstufige Lieferketten.

6 Zusammenfassung

Die hohe Komplexität von Ressourcenverteilungsproblemen in logistischen Netzwerken resultiert aus vielseitigen Eigenschaften von Aufträgen und Ressourcen und den sich daraus ergebenden Szenarien. Dieser Beitrag liefert für die Entscheidungsunterstützung Klassifikations- und Beschreibungsansätze für Ressourcen und Aufträge in logistischen Netzwerken sowie eine Review existierender Modellierungsmethoden von Ressourcenverteilungsstrategien in der Simulation. Die Anwendung der mesoskopischen Simulation auf logistische Netzwerke erfordert eine effektive Umsetzung von Ressourcenverteilungen in den Simulationsmodellen. Dieser Beitrag stellt eine mögliche Umsetzung sowie die unterschiedliche Strategien vor sowie deren Kombination an einem Anwendungsbeispiel. Zukünftige Forschung wird sich dem Zusammenspiel unterschiedlicher Strategien in logistischen Systemen widmen um Supply Chain Managern ein Werkzeug zur schnellen und einfachen Entscheidungsunterstützung zur Planung der Ressourcenverteilung zur Verfügung zu stellen.

Literatur

Abramson, D.; Buyya, R.; Giddy, J.: A Computational Economy for Grid Computing and Its Implementation in the Nimrod-G Resource Broker. In: Future Generation Computer Systems (FGCS) Journal, 18(2002) 8, , S. 1061-1074.

Chavez, A.; Moukas, R.; Maes, P.: A Multi-agent System for Distributed Resource Allocation, ACM Press, 1997, S. 323-331.

Gomoluch, J.; Schroeder, M.: Market-based Resource Allocation for Grid Computing: A Model and Simulation. In: Proceedings of the First International Workshop on Middleware for Grid Computing, Rio de Janeiro, 2003.

Doleschal, D.; Lange, J.; Weigert G.; Klemmt, A.: Improving flow line scheduling by upstream mixed integer resource allocation in a wafer test facility. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.) Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, S. 2037-2048.

Hubscher-Younger, T.; Mostermann, P.J.; DeLand, S.; Orqueda, O; Eastman, D.: Integrating Discrete-event and time-based models with optimization for resource allocation. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.) Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, S. 2690-2704.

Kakhbod, A. Resource Allocation in Decentralized Systems with Strategic Agents, University of Michigan, MI, USA, Dissertation, 2013.

Kelton, D.W.; Kasaie, P.; Vaghefi, A.; Naini, S.G.R.: Toward optimal resource-allocation for control of epidemics: An agent-based simulation approach. In: Johansson, B.; Jain, S.; Montoya-Torres, J.; Hugan, J.; Yücesan, E. (Hrsg.) Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, S. 2237-2247.

Kim, S.W.; Choi, K.: A Dynamic Resource Allocation on Service Supply Chain. In: Kordic, V. (Hrsg.) Supply Chain, Theory and Applications, I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria, 2008, S.351-386

Reggelin, T.: Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2011.

Reggelin, T.; Tolujew, J.: A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Logistics Processes. In: Jain, S., Creasey, R. R., Himmelspach, J., White, K. P., Fu, M. (Hrsg.) Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, IEEE, Piscataway, S. 1513-1523.

Schenk, M.; Tolujew, J.; Reggelin, T.: A Mesoscopic Approach to the Simulation of Logistics Systems. In: Dangelmaier, W. et al. (Hrsg.) Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics, Berlin, Springer, 2010, S. 15-25.

Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T.: Mesoscopic Modeling and Simulation of Logistics Networks, In: Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Moskau, 2009, S. 287-290.

Schuster, T., 2012. Modellierung, Integration und Analyse von Ressourcen in Geschäftsprozessen, Dissertation, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 35-49.

Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., Siemens PLMS Inc., Tecnomatix Plant Simulation 10, Step-by-Step Help, http://m.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/PlantSimulation_Step-By-Step_ENU_tcm1224-143387.pdf, accessed on 28.02.2013, S. 174-181.

Tolujew, J.; Reggelin, T.; Kaiser, A.: Discrete Rate Simulation als grundlegendes Paradigma bei der Entwicklung von mesoskopischen Flussmodellen. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.) Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2010, S. 437-444.

Ventana Systems Inc. Allocation by Priority, http://vensim.com/allocation-by-priority-alloc-p/, accessed on 28.02.2013.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Multikriterielle Entscheidungsunterstützung für die Synthese von Herstellprozessen zur Fertigung funktional gradierter Bauteile

Multi-criteria decision support for the manufacturing process synthesis of functionally graded components

Vinzent Rudtsch, Jürgen Gausemeier, Marcus Petersen, Heinz Nixdorf Institut,
Lehrstuhl für Produktentstehung, Universität Paderborn (Germany),
vinzent.rudtsch@hni.upb.de, juergen.gausemeier@hni.upb.de,
marcus.petersen@hni.upb.de

Abstract: Functional gradation denotes a continuous distribution of properties over at least one spatial dimension of a component made of single material. This distribution is tailored with respect to the later intended application of the component. The improved material utilization enables light weight design and reduced resource consumption, thus offering an alternative for modern composite materials. To support the production planner in setting up the required manufacturing processes, this contribution proposes a multi-criteria decision-support approach that is based upon a framework for the computer-aided planning and optimisation of functionally graded components. The obtained ranking of possible process chains then allows the production planner to select the best alternative.

1 Einleitung und Problemanalyse

In diesem Beitrag wird eine Methodik zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung für die Synthese von Herstellprozessen zur Fertigung von funktional gradierten Bauteilen vorgestellt. Funktionale Gradierung ist die gezielte und reproduzierbare Modifikation der Mikrostruktur eines Werkstoffs zur Einstellung von makroskopischen Bauteileigenschaften (bspw. Härte oder Zähigkeit). Ziel ist ein definierter Verlauf der Mikrostrukturänderung über mindestens eine räumliche Dimension. An unterschiedlichen Stellen im Bauteil entstehen scheinbar widersprüchliche Eigenschaften, die die spätere Funktion des Bauteils bestmöglich unterstützen (Steinhoff et al. 2009).

Beispiele für die Verwendung funktional gradierter Bauteile finden sich u. a. im Automobilbereich. So müssen Türinnenverkleidungen aus Kunststoff im Fall eines seitlichen Aufpralls einen Teil der Energie durch Verformung aufnehmen, dürfen dabei aber keinesfalls die Insassen verletzen. Um einen gewünschten Verformungs-

verlauf der Türinnenverkleidung während eines Unfalls zu gewährleisten, muss das Bauteil an exakt vordefinierten Stellen genau spezifizierte Materialeigenschaften aufweisen. Durch die Gradierung, z. B. der Bauteilhärte über den Bauteilquerschnitt, wird die Funktion des Bauteils wesentlich beeinflusst. Die Türinnenverkleidung wandelt sich so von einem rein dekorativen Element zu einem Funktionselement der passiven Fahrzeugsicherheit.

Bauteile mit funktional gradierten Eigenschaften stellen eine ressourcenschonende Alternative zu modernen Verbundwerkstoffen dar. Die Herstellung erfordert jedoch komplexe Herstellprozesse, die beispielsweise auf thermo-mechanisch gekoppelten Phänomenen basieren. Um das volle Potential von funktionaler Gradierung zu erschließen, bedarf es somit innovativer Methoden zur Planung und Optimierung der erforderlichen Herstellprozessketten. Im Rahmen der Optimierung werden dabei die Prozessparameter für jeden einzelnen Prozessschritt prozessübergreifend und im Kontext der gesamten Herstellprozesskette simulativ optimiert. Die dafür notwendigen Simulationen erfordern eine Vielzahl komplexer Rechenoperationen, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten. Dies führt zu einem hohen Zeit- und Ressourcenaufwand für die Planung und Optimierung jeder möglichen Fertigungskette (Biermann et al. 2012).

In Abbildung 1 sind beispielhaft die Simulationsergebnisse für den Fertigungsschritt „Pressen“ dargestellt. Diese wurden mit Hilfe einer sog. Monte-Carlo-Simulation ermittelt, die statistische Unsicherheiten durch eine hohe Anzahl von Zufallsexperimenten berücksichtigt (Andrieu et al. 2003). Die Monte-Carlo-Simulation verdeutlicht, dass die Presskraft in bestimmten Temperaturbereichen (um 170°C und 190°C) stark schwankt. Durch technische Restriktionen der Werkzeugmaschine ist eine Regelung der Temperaturführung jedoch nicht hinreichend genau möglich, den für eine maximale Presskraft optimalen Temperaturbereich um 180°C einzuhalten.

Der Prozess erfüllt zwar die Bauteilspezifikation, ist aber aufgrund der geringen Prozessrobustheit und der daraus resultierenden Ausschussquote beispielsweise nicht für die industrielle Massenproduktion geeignet. Dementsprechend würden Fertigungsketten, die auf diesem Prozessschritt basieren, in der weiteren Prozessplanung nicht mehr verfolgt werden.

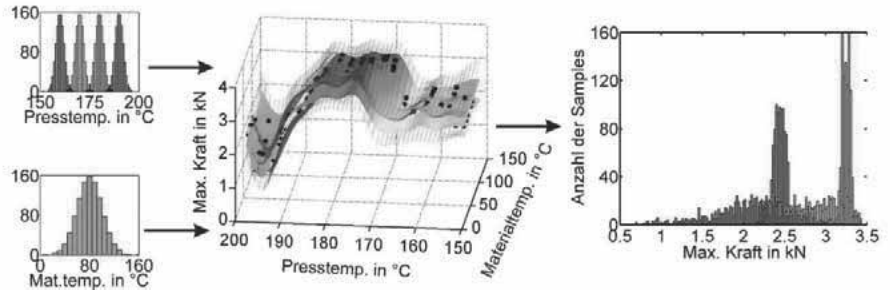


Abbildung 1: *Ergebnisse der Simulation zur Bestimmung der Presskraft in Abhängigkeit von Press- und Materialtemperatur (nach Biermann et al. 2012)*

Schon aus Kostengründen ist es sinnvoll, die Anzahl an potentiellen Lösungsalternativen frühzeitig zu verringern und nicht alle technisch möglichen

Prozessketten zu simulieren. Diese Verkleinerung des Lösungsraums muss unter Berücksichtigung bauteilindividueller Zielkriterien (z.B. Prozessrobustheit, Ressourceneffizienz etc.) durchgeführt werden.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung basiert auf einer Planungsumgebung zur rechnerunterstützten Planung, Simulation und Optimierung von Herstellprozessketten für funktional gradierte Bauteile. Die Planungsumgebung wird daher im folgenden Kapitel 2 näher erläutert, um darauf aufbauend in Kapitel 3 den Ablauf des multikriteriellen Entscheidungsverfahrens zu verdeutlichen. Kapitel 4 fasst den beschriebenen Ansatz zusammen und zeigt Potentiale für die Weiterentwicklung der Methodik auf.

2 Prozessketten für funktional gradierte Bauteile

Im folgenden Kapitel werden die Besonderheiten bei der Planung und Optimierung von Herstellprozessketten für funktional gradierte Bauteile erläutert. Dazu wird zunächst eine beispielhafte Herstellprozesskette beschrieben und anschließend die Planungsumgebung für funktional gradierte Bauteile vorgestellt.

2.1 Beispielhafte Herstellprozesskette

Die Herstellprozessketten für Bauteile mit gradierten Eigenschaften sind durch starke Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie zwischen den Fertigungsprozessen und den einstellbaren Bauteileigenschaften charakterisiert. Um diese Abhängigkeiten zu verdeutlichen, wird im Folgenden eine beispielhafte Prozesskette zur Herstellung von gradierten Polymerwerkstoffen wie z. B. Rohbauteile zur Fertigung von Türinnenverkleidungen vorgestellt. Die Eigenverstärkung der Polymerwerkstoffe basiert dabei auf hochverstreckten thermoplastische Bändchen oder Fasern, die in einer Matrix eingebettet sind und eine Orientierung auf makro-molekularer Ebene durch Festphasen- oder Schmelzedeformation aufweisen. Durch diese Eigenverstärkung reagieren die Bändchen oder Fasern empfindlich auf Druck- und Temperatureinwirkungen, wodurch eine Gradierung des Bauteils ermöglicht wird (Bledzki et al., 2011).

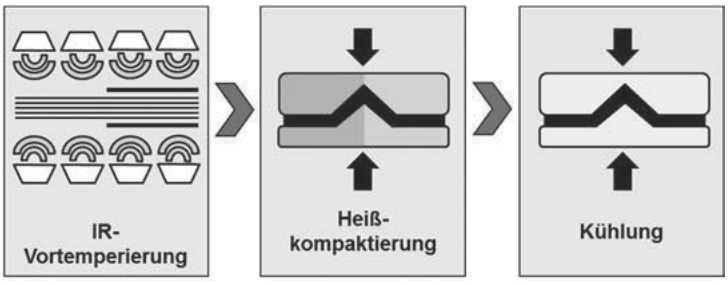


Abbildung 2: *Beispielhafte Herstellprozesskette für eigenverstärkte und gradierte Polymerwerkstoffe*

Abbildung 2 zeigt die beispielhafte Prozesskette zur Herstellung von gradierten Polymerwerkstoffen, wobei die hochverstreckten Bändchen oder Fasern zunächst in einer Infrarot-Vorheizstation durch Maskierbleche gezielt vortemperiert werden.

Anschließend wird diese thermische Gradierung mithilfe eines speziellen Pressenwerkzeugs um eine mechanische Gradierung erweitert. Das Werkzeug besitzt dazu eine spezielle Dreiecksgeometrie, die eine lokale Reduktion der Presskraft ermöglicht. Die Kühlungsphase als letzter Prozessschritt ist unter anderem notwendig, um das Bauteil entformen zu können (Paßmann 2010).

2.2 Planungsumgebung für funktional gradierte Bauteile

Die Planungsumgebung unterstützt den Planungsprozess von der Bauteilbeschreibung bis zur Spezifikation der Herstellprozesskette und besteht aus den drei Modulen „Bauteilbeschreibung“, „Expertensystem“ sowie „Modellbildung und Prozesskettenoptimierung“ (siehe Abbildung 3).

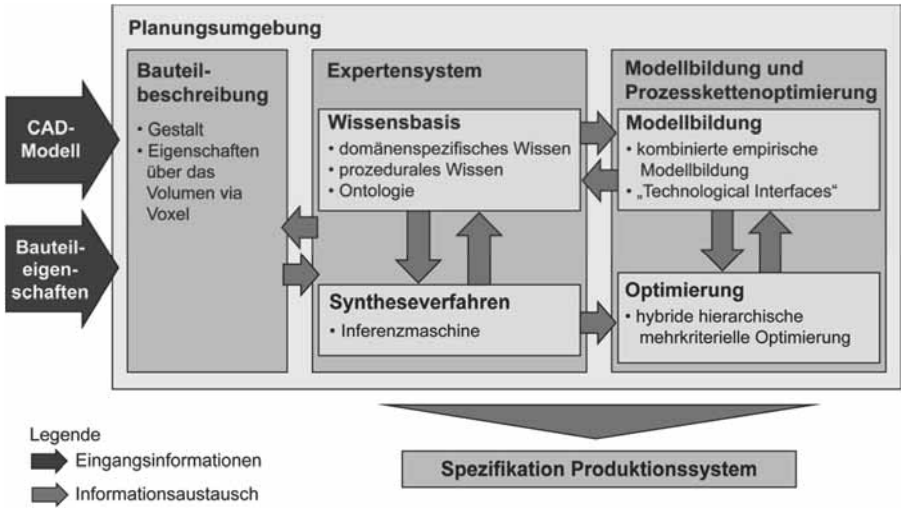


Abbildung 3: *Softwarearchitektur der Planungsumgebung*

Im Rahmen des Moduls „Bauteilbeschreibung“ wird das CAD-Modell mit Hilfe der Voxeltechnik erweitert, um die dreidimensionalen Gradierungsinformationen in das Bauteilmodell integrieren zu können (Bauer et al. 2011). Das Modul „Expertensystem“ besteht aus einer Wissensbasis und einem Syntheseverfahren. Die Wissensbasis enthält alle Informationen bezüglich der Herstellverfahren und den Eigenschaften von funktional gradierten Bauteilen. Dazu gehören beispielsweise Informationen zur Abhängigkeit der Härte einer Türinnenverkleidung von der Vorheiztemperatur des Werkstoffs vor der Umformung. Diese Informationen müssen in der Wissensbasis strukturiert und zueinander in Beziehung gesetzt werden, um eine automatisierte Auswertung zu ermöglichen. Ebenso müssen auch die Wechselwirkungen zwischen dem Bauteil und den eingesetzten Herstell-prozessen sowie zwischen den verschiedenen Herstellprozessen selbst berücksichtigt werden. Zu diesen Zwecken wird eine Ontologie eingesetzt. Das Syntheseverfahren schlägt anschließend auf Grundlage der Wissensbasis mögliche Prozessketten zur Herstellung eines funktional gradierten Bauteils vor (Gausemeier et al. 2010).

Nachdem mehrere Herstellprozessketten synthetisiert wurden, erfolgt die Parameteranpassung durch das Modul „Modellbildung und Prozesskettenoptimierung“. Dazu werden die Prozessparameter der Prozessketten durch die in der Wissensbasis hinterlegten DACE-Modelle (Design and Analysis of Computer Experiments) in Hinblick auf die Bauteilspezifikation optimiert (Wagner et al. 2008). Ziel ist eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen den in der Bauteilbeschreibung vorgegebenen Eigenschaftsverläufen und den realen Prozessergebnissen. Danach kann die Prozesskette ausgewählt werden, die aus Sicht des Planers den bestmöglichen Kompromiss zwischen den quantitativen Eigenschaften des Bauteils sowie der Erfüllung qualitativer Fertigungskriterien bildet.

Abschließend wird dem Planer die gewählte Herstellprozesskette zur Fertigung des Bauteils unter Einbezug der simulativ optimierten Prozessparameter mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS (Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems) anschaulich dargestellt (Gausemeier et al. 2011). Die Spezifikation besteht aus einem Prozess- sowie einem Ressourcendiagram. Das Prozessdiagramm stellt die Prozesskette als Folge einzelner Prozessschritte mit definierten Ein- und Ausgangsobjekten dar und im Ressourcendiagramm werden den einzelnen Prozessschritten Ressourcen zur Realisierung zugeordnet.

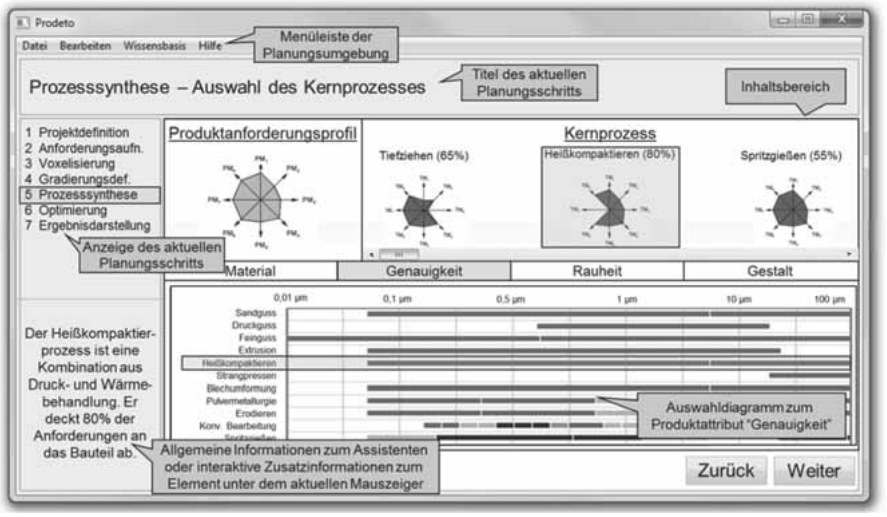


Abbildung 4: *Screenshot des Planungsassistenten*

Zur Verbesserung der Anwendbarkeit wurde ein Planungsassistent entwickelt, der den Nutzer durch den kompletten Planungsprozess der Planungsumgebung führt und bei der Eingabe der erforderlichen Daten und Informationen unterstützt. Der Assistent besteht aus sieben Schritten, wobei im ersten Schritt der Projektname eingegeben und das CAD-Modell hochgeladen wird. Im zweiten Schritt, der Anforderungsaufnahme, charakterisiert der Planer das zu verwendende Material, da dies die zur Verfügung stehenden Prozessalternativen determiniert und die Anforderungen an das Bauteil festlegt. Zu den Anforderungen zählen bspw. die Oberflächenrauheit oder die Genauigkeit, wobei auch diese Informationen für die Prozesskettensynthese benötigt

werden. Anschließend wird das zuvor hochgeladene CAD-Modell in Volumenelemente (sog. Voxel) unterteilt, damit im folgenden Schritt der dreidimensionale Eigenschaftsverlauf im Inneren des Bauteils beschrieben und genau definiert werden kann. Davon ausgehend werden im fünften Schritt Prozessketten zur Herstellung des Bauteils gebildet. Dazu werden alle zuvor angegebenen Informationen in einem Anforderungsprofil zusammengetragen und darauf aufbauend der Prozess als Kernprozess ausgewählt, der die meisten Anforderungen erfüllt (siehe Abbildung 4). Die vom Kernprozess noch nicht vollumfänglich erfüllten Anforderungen werden anschließend durch Auswahl und Verknüpfung neuer Prozesse versucht minimiert. Dabei gilt es die im Expertensystem abgebildeten Wechselwirkungen zu berücksichtigen und sofern zwei Prozessschritte der aktuellen Prozesskette inkompatibel sind, zwei neue Prozessketten mit jeweils nur einem der beiden Schritte abzuleiten. Die einzelnen Prozessparameter der Prozessketten werden in Schritt 6 optimiert, wobei die Prozesskette, die alle Anforderungen am besten erfüllt, im letzten Schritt des Assistenten mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS dem Anwender zur weiteren Planung bereitgestellt wird.

3 Multikriterielle Entscheidungsunterstützung

Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Entscheidungssituation charakterisiert, um anschließend relevante Entscheidungskriterien zu identifizieren und das Vorgehen bei der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung anhand eines Beispiels zu beschreiben.

3.1 Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung

Nachdem verschiedene Prozesskettenalternativen durch das Expertensystem vorgeschlagen wurden, ist es notwendig die am besten geeignete Prozesskette in Hinblick auf die nicht im CAD-Modell spezifizierten Anforderungen zu ermitteln. Bis zu diesem Punkt wurde jede Prozesskette unter Berücksichtigung aller technischen Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten bei der Produktion eines einzelnen Werkstücks ermittelt. Obwohl dieses Vorgehen bei der Fertigung von wissenschaftlichen Demonstratoren bzw. Kleinserien die gewünschten Resultate erzielt, sind für industriell relevante Fertigungsmengen verstärkt Faktoren der nachhaltigen Produktion zu berücksichtigen. Besonders bei komplexen Produkten wie funktional gradierten Bauteilen ist es entscheidend, die exakte Repro-duzierbarkeit der Bauteileigenschaften auch für höhere Produktionsvolumina gewährleisten zu können. Um das volle Potential der multikriteriellen Entschei-dungsunterstützung auszunutzen, müssen neben den technisch quantifizierbaren Angaben auch qualitative Kriterien berücksichtigt werden, die bei isolierten Planungsentscheidungen wie die Materialauswahl bisher nicht einbezogen werden (Huang et al. 2011).

3.2 Entscheidungskriterien

Eine der wesentlichen Herausforderungen besteht für Unternehmen heutzutage darin, eine nachhaltige Produktion im Sinne der Triple Bottom Line zu etablieren, d. h. gleichzeitig ökonomische, ökologische und soziale Anforderungen zu erfüllen (Elkington 1998). Da die Entwicklung und Herstellung funktional gradierter Bauteile sehr kostenintensiv ist, müssen für eine ökonomische Nachhaltigkeit Produktionsvolumina in industriell relevanten Mengen erzielt werden. Höhere

Produktionsmengen gehen jedoch im Allgemeinen mit steigenden Schadstoffemissionen sowie erhöhtem Effizienzdruck auf die Mitarbeiter einher. Da solche gegenläufigen Effekte in einer nachhaltigen Produktion untereinander ausgeglichen sein sollen, muss für jede neue Produktionsaufgabe ein individuelles Optimum gefunden werden. Um diese verschiedenen Anforderungsarten optimal auszubalancieren, wurde ein Kriteriensatz für jeden der drei Bereiche gemäß der Triple Bottom Line definiert. Die Kriterien basieren auf empirischen Erfahrungswerten sowie Expertenwissen und wurden in Hinblick auf eine nachhaltige Produktion von funktional gradierten Bauteilen im industriellen Maßstab ausgewählt.

Ökonomische Kriterien

- Durchschnittliche Durchlaufzeit eines Bauteil in der Prozesskette
- Bestände von fertigen und unfertigen Bauteilen in der Produktion
- Platzbedarf an begrenzten Pufferressourcen, z. B. Arbeitsflächen
- Flexibilität hinsichtlich Änderungen in der Kundenachfrage
- Varianz der Bauteilqualität innerhalb einzelner Produktions-Chargen

Ökologische Kriterien

- Energieeffizienz der Prozesskette
- Abfall- und Ausschussmengen
- Emission von Luftschadstoffen
- Recycling-Möglichkeiten der Prozessmedien
- Anteil umweltschädlicher Chemikalien, z. B. für Beschichtungen

Soziale Kriterien

- Emission von Giftstoffen und Vibrationen
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Arbeitsumgebung
- Kompatibilität der Prozesskette zu ergonomischen Anforderungen

Für jedes Kriterium muss darüber hinaus eine funktionale Metrik definiert werden, die mindestens zwei diskrete Zustände spezifizieren kann. Da verschiedene Ansätze zur Differenzierung diskreter Zustände von Entscheidungskriterien existieren, ist unter Umständen eine Anpassung der ausgewählten Metrik für ein Kriterium bei neuen Entscheidungssituationen erforderlich.

3.3 Bewertungsmethode

Mit einem festgelegten Satz geeigneter Entscheidungskriterien und verschiedenen Prozessketten muss zur Auswahl der favorisierten Alternative eine Entscheidungsmethode festgelegt werden. Beim Vergleich verschiedener Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung hat der Analytic Hierarchy Process (AHP) die besten Ergebnisse für die vorliegende Problematik der Prozesskettenauswahl erzielt. Der AHP ist ein matrizenorientierter Ansatz für komplexe Entscheidungsprobleme, der auf dem paarweisen Vergleich von Kriterien und den zur Verfügung stehenden Alternativen basiert (Saaty und Vargas 2012). In Hinblick auf die bereits erwähnten Unterschiede in den Eigenschaften der Entscheidungskriterien sprechen drei Hauptgründe für den Einsatz des AHP bei der Auswahl von Herstellprozessketten:

- Mathematische Formalisierung des Entscheidungsprozesses erhöht die Akzeptanz der Ergebnisse bei den Beteiligten signifikant
- Automatisierte Konsistenzprüfungen der Eingabewerte reduzieren die Anfälligkeit des Verfahrens gegenüber Fehlern der Anwender
- Transformation qualitativer Kriterien in quantitative Skalen ist nicht notwendig

Im nächsten Abschnitt wird das prinzipielle Vorgehen der Prozesskettenauswahl mit Hilfe des AHP anhand eines Beispiels demonstriert.

3.4 Gewichtung von Kriterien und Bewertung der Alternativen

In Kapitel 1 wurde bereits dargestellt, wie die Gradierung die Funktionalität von Türinnenverkleidungen erhöhen kann. Deshalb wird im Folgenden die Prozesskettenauswahl für dieses Bauteil exemplarisch demonstriert. Jede der von der Planungsumgebung vorgeschlagenen Herstellprozessketten besteht aus einer Reihe von Aufheiz-, Abkühl- und Bearbeitungsschritten. Die verschiedenen Alternativen unterscheiden sich dabei insbesondere hinsichtlich Anzahl und Reihenfolge der Prozessschritte sowie deren Parameter, welche simulativ optimiert wurden.

Für den paarweisen Vergleich der Kriterien und Alternativen wird beim AHP üblicherweise eine linguistische Skala genutzt, die sich von gleichbedeutend bis dominierend erstreckt. Jedem Punkt auf der Vergleichsskala ist ein numerischer Wert zugeordnet, z. B. bedeutet 1 gleichbedeutend und 9 dominierend, wobei alle Werte dazwischen die jeweiligen Abstufungen repräsentieren. Für das vorliegende Anwendungsbeispiel wird der Einfachheit halber angenommen, dass die Skala von 1 bis 5 verläuft, wobei 5 absolute Dominanz und 3 mittlere Überlegenheit ausdrückt. Dem unterlegenen Kriterium wird dabei der reziproke Wert 1/5 bzw. 1/3 zugeordnet.

Zur Prozesskettenauswahl werden beim AHP folgende drei Schritte durchlaufen:

1. *Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien bezüglich des Ziels*

Für das vorliegende Demonstrationsbeispiel wird vereinfachend angenommen, dass nur drei der vorgestellten Entscheidungskriterien zur Prozesskettenauswahl für den AHP betrachtet werden: *„Durchschnittliche Durchlaufzeit eines Bauteil in der Prozesskette“* (DLZ), *„Energieeffizienz der Prozesskette“* (EE) sowie *„Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Arbeitsumgebung“* (TLA). In Tabelle 1 ist die relative Wichtigkeit der drei Kriterien nach dem paarweisen Vergleich dargestellt:

Tabelle 1: *Matrix der relativen Kriteriengewichtung zur nachhaltigen Produktion einer funktional gradierten Türinnenverkleidung*

Relative Kriteriengewichtung	Ökonomisches Kriterium	Ökologisches Kriterium	Soziales Kriterium
	DLZ	EE	TLA
DLZ	1	3	5
EE	1/3	1	2
TLA	1/5	1/2	1

Die für den AHP durchgeführte Berechnung des Eigenvektors der Matrix ergibt die Rangfolge der Kriterien hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für das übergeordnete Ziel:

1. DLZ – 64,8 % 2. EE – 22,9 % 3. TLA – 12,3 %

Der AHP ermöglicht darüber hinaus die Bewertung der Gewichtungsmatrix mit einem Inkonsistenzfaktor der auf dem Eigenwert der Matrix beruht. Im vorliegenden Fall der Tabelle 1 beträgt der Inkonsistenzfaktor 1,9 % und ist damit unauffällig, da der AHP ausreichend robust ist, um Inkonsistenzen bis zu 10 % zu tolerieren.

2. *Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien bezüglich des Ziels*

Sobald die Kriteriengewichtung festgestellt wurde, werden alle Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium paarweise miteinander verglichen. Für das vorliegende Demonstrationsbeispiel wird vereinfachend von zwei verschiedenen Prozessketten A und B ausgegangen, die sich in Reihenfolge und Parameter der Prozessschritte unterscheiden. Während Prozesskette A auf eine schnelle und flexible Fertigung abzielt, ist Prozesskette B äußerst energieeffizient und bietet eine angenehmere Arbeitsumgebung für die Werker. Die zwei Prozessketten werden dann für alle drei Kriterien auf Basis der eingeführten linguistischen Skala miteinander verglichen.

Tabellen 2-4: *Bewertung aller Alternativen bzgl. der definierten Kriterien*

DLZ	A	B
A	1	3
B	1/3	1

EE	A	B
A	1	1/5
B	5	1

TLA	A	B
A	1	1/4
B	4	1

Da die Bewertungen in den Tabellen 2-4 für jedes Kriterium nur zwei Alternativen enthält, ist die Inkonsistenz automatisch 0 % und daher unauffällig.

3. *Bildung der konsolidierten Rangfolge*

Mit einer vollständigen Bewertung aller Alternativen für jedes Kriterium und der Gewichtung aller Kriterien zueinander, berechnet der AHP die konsolidierte Rangfolge der Alternativen auf Basis einer Reihe von Matrizenmultiplikationen. Eine detaillierte Darstellung des Vorgehens wird von Saaty und Vargas (2012) beschrieben. Für das Demonstrationsbeispiel ergibt sich folgende Rangfolge:

1. Herstellprozesskette B – 58,7 % 2. Herstellprozesskette A – 41,3 %

In diesem Fall würde Prozesskette B ausgewählt werden, da die Nachteile in der Durchlaufzeit verglichen mit Prozesskette A durch weit überlegene Energieeffizienz und deutlich bessere Arbeitsbedingungen für die Angestellten kompensiert werden. Bei eventuell auftretenden Unsicherheiten während der Kriteriengewichtung oder dem Vergleich der Alternativen sollte eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Zu diesem Zweck werden die Kriteriengewichte sowie die Bewertungen der Alternativen innerhalb des Unsicherheitsbereichs variiert. Falls das Endergebnis dadurch stark beeinflusst wird, müssen zusätzliche Informationen über die Entscheidungssituation eingeholt bzw. weitere Kriterien in Erwägung gezogen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Funktional gradierte Bauteile bilden eine neue Möglichkeit für individuell an den Einsatzzweck angepasste Produkte. Zur Planung, Simulation und Optimierung der dafür erforderlichen Herstellprozessketten wurde eine Planungsumgebung vorgestellt und um eine Methodik zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung ergänzt. Der Ansatz wurde anschließend am Beispiel einer Herstellprozesskette für eine funktional gradierte Türinnenverkleidung demonstriert. Aufgrund der mathematischen Formalisierung des AHP wird die Akzeptanz der Ergebnisse bei den Anwendern deutlich erhöht, indem der Anteil von Zufalls-Entscheidungen transparent verringert wird. Die mathematischen Prinzipien sind jedoch nicht selbsterklärend, so dass es erforderlich ist die Hintergründe des Verfahrens offen zu kommunizieren, um Missverständnisse zu vermeiden. In Zukunft soll die Entscheidungsunterstützungs-Komponente stärker mit der Prozesskettensimulation gekoppelt werden, um Simulationsergebnisse automatisiert in den Bewertungs-prozess einfließen zu lassen. Darüber hinaus wird die Wissensbasis um weitere Prozessschritte ergänzt und die Ontologie erweitert, um zunehmend komplexere Herstellprozessketten realisieren zu können.

Literatur

Andrieu, C.; de Freitas, N.; Doucet, A.; Jordan, M. I.: An Introduction to MCMC for Machine Learning. Machine Learning, Volume 50, 2003.

Bauer, F.; Dettmer, D.; Gausemeier, J.: Feature-based component description for functional graded parts, in: Proc. 4th Int'l. Conf. Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2011), Oct. 2-5th 2011, Montreal, Canada, S. 239-244.

Biermann, D.; Gausemeier, J.; Heim, H.-P.; Hess, S.; Petersen, M.; Ries, A.; Wagner, T.: Computer-Aided Planning and Optimisation of Manufacturing Processes for Functional Graded Components, in: Proc. 1st Int'l. Conf. Thermo-Mechanically Graded Materials, Oct. 29-30th 2012, Kassel, Germany, S. 195-200.

Bledzki, A. K.; Ries, A.; Paßmann, D.: Functional graded self-reinforced polypropylene sheets, Polimery 56 (2011), S. 369-374.

Elkington, J.: Accounting for the Triple Bottom Line, in: Measuring Business Excellence, Vol. 2 (3) (1998), S. 18-22.

Gausemeier, J.; Bauer, F.; Dettmer, D.; Reyes-Perez, M.: Planning of Manufacturing Processes for Graded Components. In: Proc. 1st Int'l. Conf. Product Property Prediction – P3, Apr. 12-13th 2010, Dortmund (Germany), S. 177-187.

Gausemeier, J; Dumitrescu, R.; Kahl, S.; Nordsiek, D.: Integrative Development of Product and Production System for Mechatronic Products. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27 (4) (2011), S. 772-778.

Huang, H.; Zhang, L.; Liu, Z.; Sutherland, J. W.: Multi-criteria decision making and uncertainty analysis for materials selection in environmentally conscious design. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, February 2011, Vol. 52 (5-8), S. 421-432.

Paßmann, D.: Prozessinduzierte Gradierung eigenverstärkter Polypropylen-Faserverbunde beim Heißkompaktieren und Umformen. Dissertation, Kassel, Universität Kassel (2010).

Saaty, T.L.; Vargas, L.G.: Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 175 (2010)

Steinhoff, K.; Maier, H. J.; Biermann, D.: Functionally Graded Materials in Industrial Mass Production. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2009.

Wagner, T.; Passmann, D.; Weinert, K.; Biermann, D.; Bledzki, A. K.: Efficient modeling and optimisation of the property gradation of self-reinforced polypropylene sheets within a thermo-mechanical compaction process. In: Proc. 6th CIRP Int'l. Conf. Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2008), Naples (Italy), July 23-25th 2008, S. 447-452.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Ein Ontologie-basierter Modellierungs- und Simulationsansatz am Beispiel der ressourceneffizienten Planung spanender Prozessketten

An Ontology-Based Modelling and Simulation Approach Using the Example of Resource Efficient Planning of Metal-Cutting Process Chains

Artur Schmidt, Thorsten Pawletta, Hochschule Wismar, Wismar (Germany),
artur.schmidt@hs-wismar.de, thorsten.pawletta@hs-wismar.de

Abstract: A new modelling and simulation method is discussed which allows a quantitative energy and resource efficient related evaluation of manufacturing process chains. In general, this method is based on: (i) an ontological metamodel approach, (ii) a model base and (iii) automatic model generation capabilities. The method is illustrated by using a comprehensive manufacturing example. A special focus is set on the ontological metamodel approach for specifying different competing process structures. In conclusion, some results of the manufacturing example are discussed and an outlook of potential future research is given.

1 Problemstellung

Steigende Rohstoff- und Energiepreise stellen produzierende Unternehmen vor neue Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund werden zunehmend Methoden der Modellbildung und Simulation eingesetzt, um den Ressourcenverbrauch von fertigungstechnischen Prozessketten quantitativ zu untersuchen. Meistens steht die Untersuchung von logistischen, produktionssteuerungstechnischen und gebäudetechnischen Aspekten im Vordergrund (Junge 2007).

Gemäß der Forderung von Neugebauer (2008) die Ressourceneffizienz der Fertigungsverfahren in Prozessketten insgesamt zu analysieren, wurden von Weinert (2010) und Larek (2012) erste Modellbibliotheken für spezielle Fertigungsverfahren entwickelt. Diese basieren auf einem zeitdynamischen ereignisorientierten Modellierungsansatz und ermöglichen somit nicht nur die Berechnung von Ressourcenverbräuchen, sondern auch die zeitliche Bewertung von Verbrauchsspitzen. Die vordefinierten Modelle können parametriert und zu Prozessketten komponiert werden.

Bei realen Problemstellungen kann die manuelle Komposition und Parametrierung von Prozesskettenstrukturen aufgrund der Variantenvielfalt sehr aufwendig werden. Larek et al. (2013) sehen einen Lösungsansatz in der Metamodellierung in Kombination mit automatischen Modellgenerierungskonzepten und simulationsbasierten Optimierungstechniken. Unter einem Metamodell wird in diesem Zusammenhang eine formale Spezifikation von einer Menge alternativer Modellstrukturen und Modellparametrierungen verstanden.

Die Prinzipien der fertigungstechnischen Prozesskettenmodellierung/-simulation werden am Beispiel der von Larek (2012) entwickelten und durch Schmidt (2012) weiterentwickelten Modellbibliothek (*MB*) dargestellt. Bestehende Probleme werden identifiziert und Lösungen diskutiert. Anschließend erfolgt eine Konzentration auf das Problem der Varianten- und Parametervielfalt. Basierend auf der System Entity Structure (*SES*) Ontologie von Zeigler und Hammonds (2007) wird ein Metamodellierungskonzept zur Spezifikation alternativer Prozesskettenstrukturen eingeführt. Im Vergleich zu den Arbeiten von Larek et al. (2013) werden neue SES Konstrukte zur Vereinfachung der Modellierung der Parametervielfalt vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine Einführung in die automatische Generierung von Prozesskettenmodellen in MATLAB/SimEvents, welche auf dem SES/MB Framework von Zeigler et al. (2000) basiert. Hierfür wird die von Schwatinski et al. (2012) entwickelte *Tiny SES Toolbox* verwendet. Abschließend werden exemplarische Simulationsergebnisse demonstriert.

2 Klassische Prozesskettenmodellierung/–simulation: Vorgehen, Probleme und Lösungsansätze

Die klassische Vorgehensweise der Modellbildung und Simulation unter Verwendung moderner Simulationsumgebungen besteht aus drei wesentlichen Schritten: (i) *Komponentenmodellierung*, (ii) *Modellgenerierung* und (iii) *Modellausführung*. Im Rahmen der Komponentenmodellierung werden dynamische Modelle einzelner Systemkomponenten erstellt und in einer MB organisiert. Bei der Modellgenerierung erfolgt eine Komposition und Parametrierung der Modellkomponenten der MB zu einem modular-hierarchischen Modell. Die anschließende Modellausführung geschieht manuell oder teilautomatisiert. Die Darstellung der genannten Schritte erfolgt anhand der von Larek (2012) vorgestellten und in Schmidt (2012) weiterentwickelten Modellbibliothek. Dazu werden exemplarisch drei alternative Prozessketten und deren Ressourcenverbräuche zum Herstellen von rotationssymmetrischen Werkstücken betrachtet (Abb. 1). Die Prozessketten bestehen aus folgenden Fertigungsverfahren:

1. Außenlängsdrehen (ALD), Vakuumhärten (VH), Anlassen (A), Außenrundschleifen (ARS)
2. Außenlängsdrehen, Induktionshärten (IH), Anlassen, Außenrundschleifen
3. Außenlängsdrehen, Außenrundschleifhärten (ARSH)

Jedes Fertigungsverfahren ist als ein ereignisdiskretes Modell, Basismodell genannt, in MATLAB/SimEvents modelliert und in einer MB organisiert. Die Basismodelle können in drei Grundtypen klassifiziert werden: (i) *CNC-Satzbasierte Modelle*, (ii) *Messdatenbasierte Modelle* und (iii) *Hilfsmodelle*. Bei den CNC-Satzbasierten Modellen ALD, ARS und ARSH werden die Betriebszustände, Zustandsübergänge

und die Ressourcenverbräuche direkt auf Basis der CNC-Programme berechnet. Die Basismodelle VH, IH und A zählen zur Klasse der messdatenbasierten Modelle. Ihr dynamisches Verhalten und der Ressourcenverbrauch werden unmittelbar aus Messdaten der realen Fertigungseinrichtungen identifiziert. Zu den Hilfsmodellen gehören eine Quelle (Q) und eine Senke (SK). Q und SK dienen der Generierung und Terminierung von Werkstücken, welche als Entitäten abgebildet werden. Die werkstückspezifischen Eigenschaften wie Werkstofftyp und Werkstückgeometrie, werden als Attribute der Entitäten modelliert.

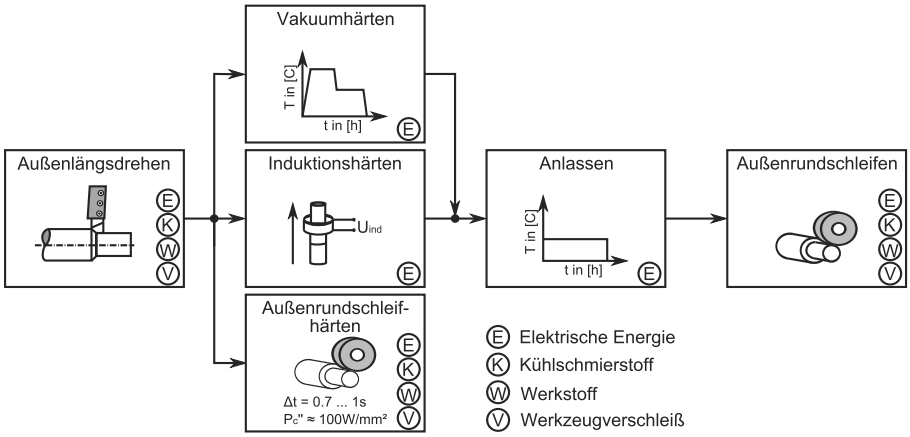


Abbildung 1: *Prozessskettenstrukturen mit den zu betrachtenden Ressourcenarten je Fertigungsverfahren nach Larek (2012).*

Die Basismodelle können in MATLAB/SimEvents manuell zu Prozessketten komponiert, parametriert und ausgeführt werden (Abb. 2). Als ausgewähltes Simulationsergebnis zeigt Abbildung 2 weiterhin die zeitliche Leistungsaufnahme der zugehörigen Prozesskette zur Herstellung von 12 Werkstücken.

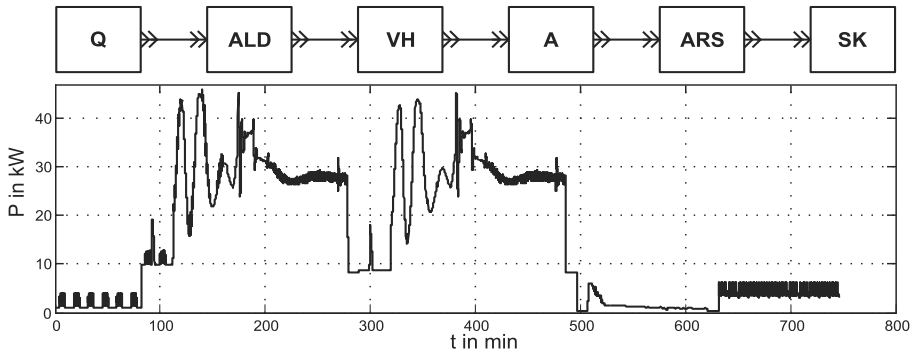


Abbildung 2: *Ereignisdiskretes Simulationsmodell der ersten Prozesskette in MATLAB/SimEvents und berechnete zeitabhänge Leistungsaufnahme.*

Alternative Prozesskettenstrukturen, unterschiedliche Werkstofftypen und umfangreiche Wertebereiche der Fertigungsparameter führen nach Larek et al. (2013) zu einer hohen Vielfalt an Prozesskettenvarianten (Strukturen + Parametrierungen) bei realen Problemstellungen. Zur Beherrschung der Variantenvielfalt schlagen sowohl Larek et al. (2013) als auch Hagendorf und Pawletta (2011) Metamodellierungskonzepte vor. Im nachfolgenden Kapitel wird ein Metamodellierungsansatz zur Spezifikation von Prozesskettenvarianten eingeführt.

3 Ontologische Prozesskettenmodellierung mit der System Entity Structure

Die System Entity Structure (SES) ist eine Ontologie, welche ursprünglich zur Repräsentation von Systemstrukturen in der Simulationstechnik eingeführt wurde. Sie definiert alle typischen Elemente einer anwendungsbezogenen Ontologie: (i) *Konzeptionalisierung*, (ii) *Taxonomie*, (iii) *Vererbung* und (iv) *Instanziierung*. Eine SES wird durch einen gerichteten und beschrifteten Baum dargestellt. Die Knoten des Baumes gliedern sich in zwei Kategorien: (i) *echte Knoten* und (ii) *deskriptive Knoten*. Echte Knoten repräsentieren Objekte der realen oder imaginären Welt, welche allgemein als Entitäten bezeichnet werden. Deskriptive Knoten beschreiben die Beziehung des direkten (echten) Vorgängerknotens mit dem direkten (echten) Nachfolgerknoten. Die Namen der deskriptiven Knoten besitzen stets einen Suffix wie *Dec*, *Spec*, oder *MultiAspect*. Die Endung Dec kennzeichnet einen Aspekt und beschreibt die Dekomposition einer Entität. Knotennamen mit der Endung Spec spezifizieren eine Spezialisierung und stellen die Taxonomie einer Entität dar. Der Suffix MultiAspect repräsentiert einen Multiplen-Aspekt, der die Zerlegung einer Entität in typengleiche Entitäten beschreibt. Bei der Modellierung mit einer SES muss die grundlegende Abfolge der Knoten beachtet werden. Es gilt einen alternierenden Modus von echten und deskriptiven Knoten einzuhalten. Dabei ist zu beachten, dass der Wurzelknoten und die Blattknoten immer Entitäten darstellen. Bezüglich umfassenderer Darstellungen sei auf die originäre Quelle Zeigler und Hammonds (2007) beziehungsweise auf Schwatinski et al. (2012) verwiesen.

Abbildung 3 zeigt die Spezifikation der Prozesskettenvarianten aus Abbildung 1 mit einer SES. Beispielhaft wird angenommen, dass das zu fertigende Werkstück aus zwei verschiedenen Materialtypen hergestellt werden kann. Weiterhin sollen werkstoffspezifisch jeweils fünf verschiedene Einstellungen für die Fertigungsparameter der Verfahren ALD und ARS zulässig sein. Aus den drei alternativen Prozesskettenstrukturen und den zulässigen Parametereinstellungen folgen mehrere tausend Prozesskettenvarianten pro Werkstofftyp. Aus Platzgründen sind die Knotenattribute der Entitäten sowie die im unteren Teil spezifizierten SES Variablen und Funktionen nur teilweise dargestellt.

Alle Blattknoten der SES entsprechen einem Basismodell der MB, was durch das Knotenattribut *{mb = …}* gekennzeichnet ist. Der Wurzelknoten *Prozesskette* mit dem nachfolgenden Aspekt *ProzessketteDec* beschreibt die Zerlegung jeder *Prozesskette* in die Entitäten *Q*, *ALD* und *SK* sowie in eine spezielle Prozessvariante *PV*. Die Kopplungsbeziehungen der einzelnen Entitäten eines Aspekt-Knotens sind an der Aspekt-Kante definiert. Das Tupel *(Q.out, ALD.in)* an der

ProzessketteDec-Kante bedeutet, dass der Ausgangsport von Q mit dem Eingangsport von ALD verbunden ist.

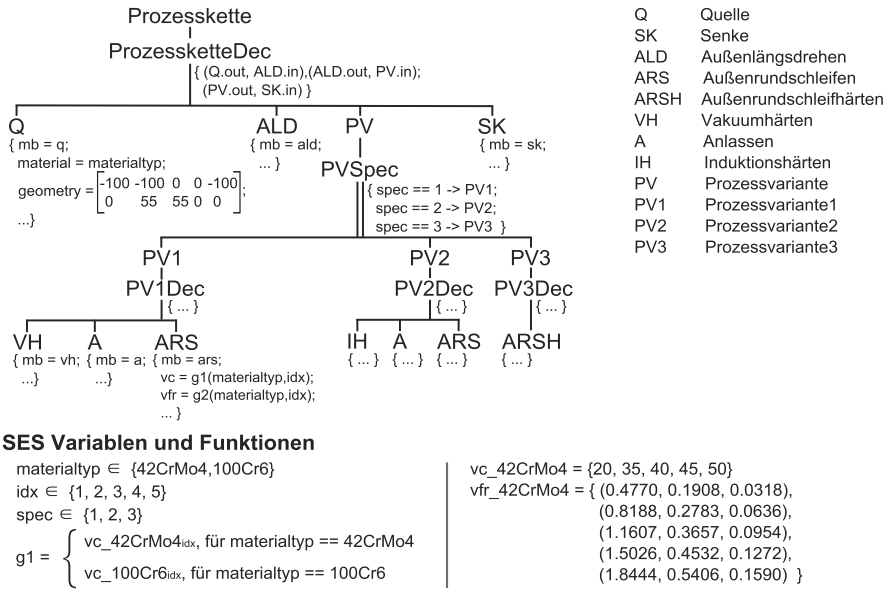


Abbildung 3: *SES zur Spezifikation der Prozesskettenstrukturen aus Abbildung 1 einschließlich zulässiger Parametrierungen.*

Die Spezialisierung *PVSpec* beschreibt, dass die Entität PV durch eine der Nachfolger-Entitäten *PV1-PV3* zu konkretisieren ist. Die Auswahlregeln an der Kante von PVSpec definieren, wie die Konkretisierung bei der Modellgenerierung zu erfolgen hat. Im vorliegenden Beispiel erfolgt die Konkretisierung in Abhängigkeit von der SES Variablen *spec*. Die spezialisierten Prozessvarianten PV1-PV3 sind zusammengesetzte Entitäten, die im Kontext einer Systemsimulation gekoppelte Systeme darstellen. Ihre Zerlegung wird durch die zugehörigen Aspekte *PV1Dec-PV3Dec* beschrieben.

In der dargestellten SES definieren alle Blattknoten Knotenattribute *{…}*. Sie spezifizieren die zulässigen Parametrierungen des entsprechenden Basismodells. Die Entität Q besitzt zum Beispiel die Knotenattribute *material* und *geometry*. Das Knotenattribut geometry ist eine Konstante und definiert in Form einer z-x-Koordinatenmatrix eine Anfangsgeometrie für alle zu erzeugenden Werkstücke. Material ist ein Knotenattribut, deren Wert sich aus der SES Variablen *materialtyp* ergibt. Die zulässige Wertemenge der SES Variablen materialtyp ist im Abschnitt SES Variablen und Funktionen definiert (Abb. 3). Eine konkrete Wertzuweisung erfolgt erst während der Modellgenerierung (vgl. Kapitel 4). Damit definieren die SES Variablen eine Art Eingangsschnittstelle. Die Spezifikation der differenzierten fertigungstechnischen Parameter ist am Blattknoten *ARS* der Prozessvariante PV1 anhand der Knotenattribute *vc* und *vfr* dargestellt. Ihre Belegung ist von dem zu bearbeitenden Werkstofftyp und der für den Werkstofftyp zulässigen Wertemenge abhängig. Diese beiden Sachverhalte sind mit SES Variablen und SES Funktionen

spezifiziert. In Abbildung 3 sind beispielhaft die SES Variablen mit den zulässigen Wertemengen für den Werkstofftyp 42CrMo4 *(vc_42CrMo4; vrf_42CrMo4)* und die SES Funktion *g1(materialtyp,idx)* definiert. Der Funktionsparameter *idx* ist ebenfalls eine SES Variable. Sie kodiert den Index zur Zuordnung eines Fertigungsparameters aus der geordneten Wertemenge. Die ebenfalls am ARS Knoten benutzte SES Funktion *g2(materialtyp,idx)* ist analog zur Funktion g1 aufgebaut.

Die von Schwatinski et al. (2012) eingeführte Definition von SES Variablen und Funktionen stellt eine Erweiterung zur originären SES Ontologie dar. Sie ermöglichen sowohl eine einfache Spezifikation von alternativen Prozessketten als auch implizite Spezifikation von Zwangsbedingungen über Knotenattribute. Dies reduziert die Komplexität der Baumstruktur. Weiterhin unterstützen die SES Variablen und Funktionen eine einfache Erweiterung von SES Spezifikationen. Soll beispielsweise die betrachtete SES um einen neuen Werkstofftyp erweitert werden, so ist lediglich eine Anpassung bei der Definition der SES Variablen und Funktionen durchzuführen. Im Vergleich zu den SES basierten Modellen von Larek et al. (2013) sowie von Hagendorf und Pawletta (2011) zeichnet sich die SES in Abbildung 3 durch eine wesentlich bessere Übersichtlichkeit und vereinfachte Erweiterbarkeit aus.

4 Vom ontologischen Modell zum ausführbaren Simulationsmodell

Die Entwicklung der SES Ontologie ist eng mit den Arbeiten zur Discrete Event System Specification (DEVS) verbunden. In diesem Zusammenhang wurden auch Methoden zur automatisierten Modellgenerierung entwickelt. Die Kombination dieser Methoden mit der SES und MB wird *SES/MB Framework* (Abb. 4) genannt (Zeigler et al. 2000). Schwatinski et al. (2012) stellen mit der Tiny SES Toolbox die Methoden des SES/MB Frameworks allgemein für MATLAB/Simulink sowie die SimEvents Toolbox zur Verfügung.

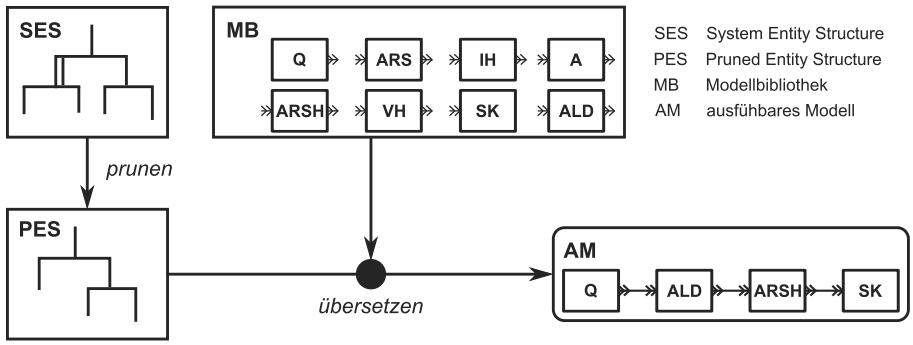


Abbildung 4: *Prinzip des SES/MB Ansatzes.*

Die Menge der Systemstrukturen und der zulässigen Parametrierungen wird gemäß Kapitel 3 in einer SES spezifiziert. Die dynamikbeschreibenden Modellkomponenten werden als konfigurierbare Basismodelle in einer MB organisiert. Im Rahmen der Modellgenerierung wird im ersten Schritt (*prunen*) eine

konkrete, parametrierte Systemstruktur aus der SES abgeleitet. Dazu müssen den SES Variablen gemäß den Wertebereichsdefinitionen Werte zugewiesen werden. Für die SES in Abbildung 3 werden beispielsweise folgende Wertzuweisungen angenommen: *spec=1*, *materialtyp=42CrMo4, idx=1*.

Durch die Variablenbelegung spec=1 wird am deskriptiven Knoten PVSpec die Entität PV1 mit dem zugehörigem Teilbaum ausgewählt. Die Belegung der Variablen materialtyp ermöglicht eine konkrete Wertzuweisung beim Knotenattribut material an der Entität Q. Die Auflösung der Funktionen g1 und g2 ermöglichen die Wertzuweisung der Knotenattribute vc und vfr an der Entität ARS. Das Ergebnis ist eine reduzierte Baumstruktur ohne entscheidungsbehaftete Ausdrücke. Zeigler et al. (2000) bezeichnen diesen Vorgang als Prunen, weshalb die reduzierte Baumstruktur Pruned Entity Structure (*PES*) genannt wird. Die PES in Abbildung 5 repräsentiert eine Prozesskettenvariante (Struktur + Parametrierung) der ersten Prozesskettenstruktur nach Abbildung 1.

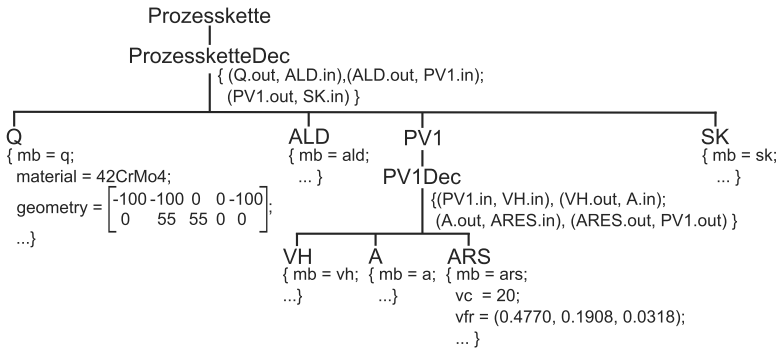


Abbildung 5: *PES der ersten Prozesskette mit angedeuteten Knotenattributen.*

Im zweiten Schritt (*übersetzen*) der Modellgenerierung erzeugt ein Modellübersetzer auf Basis der PES und den Modellkomponenten der MB ein ausführbares Modell (*AM*) gemäß Abbildung 2. Das AM kann anschließend durch den Simulator der Simulationsumgebung ausgeführt werden.

Zur Verarbeitung mit der Tiny SES Toolbox muss eine SES prädikatenlogisch in SWI-Prolog formuliert werden. Zu diesem Zweck stellen Schwatinski et al. (2012) dem Anwender vordefinierte SES Prädikate zur Verfügung, so dass in keinem Fall das Erlernen von Prolog erforderlich ist.

Der in SWI-Prolog implementierte Prune Algorithmus wird vom Anwender über eine MATLAB Funktion aufgerufen. Als Parameter sind der Name der SES Datei und die Werte der SES Variablen zu übergeben. Anhand der SES Variablen erzeugt SWI-Prolog eine PES und übermittelt diese in Form von Strings zurück an MATLAB. Weiterhin stellt die Tiny SES Toolbox die Modellübersetzung in Form einer MATLAB Funktion zur Verfügung (Schwatinski und Pawletta 2013). Diese generiert unter Verwendung der Simulink API aus der PES und der MB ein ausführbares MATLAB/SimEvents Modell. Da die Methodik automatisierte Modelluntersuchungen zum Ziel hat, verzichtet die Tiny SES Toolbox auf die Generierung von Subsystemen und löst diese automatisch auf. Bezüglich näherer

Details zur Prolog-MATLAB Schnittstelle und zur Modellübersetzung sei auf die Veröffentlichung von Schwatinski und Pawletta (2013) verwiesen.

5 Exemplarische Prozesskettenuntersuchung

Zur Validierung der methodischen Ansätze und zur Verifikation der entwickelten Softwarewerkzeuge wurde eine von Larek et al. (2013) beschriebene Prozesskettenuntersuchung durchgeführt. Bei dem Beispiel handelt es sich um ein simulationsbasiertes Optimierungsproblem. Die Zielstellung kann wie folgt formuliert werden: Ausgehend von den Prozesskettenstrukturen in Abbildung 1 ist eine Prozesskettenvariante (Struktur + Parametrierung) gesucht, bei der der elektrische Energieverbrauch (E_v), der Kühlschmierstoffverbrauch (K_v) und der Werkzeugverschleiß (V) minimal sind. Die meisten simulationsbasierten Optimierungsansätze betrachten nur Parameteroptimierungsprobleme bezogen auf ein Modell mit einer statischen Modellstruktur (März et al. 2011). Für die Durchführung der Optimierung mit den genannten Zielen wird auf den Ansatz von Hagendorf und Pawletta (2011) aufgebaut. Dieser Ansatz ermöglicht eine simulationsbasierte Struktur- und Parameteroptimierung (*SSPO*) auf Basis des SES/MB Frameworks in Kombination mit einem Genetischen Algorithmus (*GA*).

Das Anwendungsbeispiel enthält einen strukturbezogenen Optimierungsparameter am deskriptiven Knoten PVSpec (Abb. 3). Dieser ist mit der Variablen spec kodiert und besitzt die Wertemenge *{1, 2, 3}*. Dazu kommen weitere fertigungstechnische Optimierungsparameter in Form von Modellparametern der Basismodelle. Die konkreten Optimierungsparameter lauten: ap_{ALD}, f_{ALD} und vc_{ALD} an der Entität ALD und vc_{ARS}, vfr_{ARS} als 3x1 Vektor bestehend aus den Zustellungen für das Schruppen, Schlichten und Feinschlichen an der Entität ARS. Diese sind nur teilweise als Knotenattribute und SES Variablen in Abbildung 3 dargestellt.

Der GA stellt für die Modellgenerierung und Modellausführung den übergeordneten Experimentrahmen dar. Der aktuell berechnete Parametervektor des GA initialisiert die SES Variablen für die nächste Modellgenerierung und anschließende Modellausführung. Die Simulationsergebnisse jeder Modellvariante werden durch eine Gütefunktion (s. Gl. 1) bewertet. Die Gütefunktion beinhaltet normierte Verbräuche welche mit Gewichtungsfaktoren behaftet zu einem Verbrauchswert verdichtet werden.

$$G = \frac{1}{3}E_v + \frac{1}{3}K_v + \frac{1}{3}V \rightarrow \min \tag{1}$$

Abbildung 6 zeigt die Simulationsergebnisse der Prozesskettenuntersuchung. In Abbildung 6 entspricht jede Experimentnummer einer konkreten Prozesskettenvariante. Als GA wurde identisch zu den Arbeiten von Larek et al. (2013) die MATLAB Global Optimization Toolbox verwendet. Der GA untersucht von den mehreren tausend möglicher Prozesskettenvarianten etwas weniger als 240. Die optimale Prozesskettenvariante wird im 219. Experimentdurchlauf ermittelt. Diese repräsentiert die dritte Prozesskettenstruktur, bestehend aus den Fertigungsverfahren ALD und ARSH, mit den optimierten Fertigungsparametern für vc_{ALD}, f_{ALD} und ap_{ALD}. Die Ergebnisse entsprechen den Untersuchungsergebnissen von Larek et al (2013).

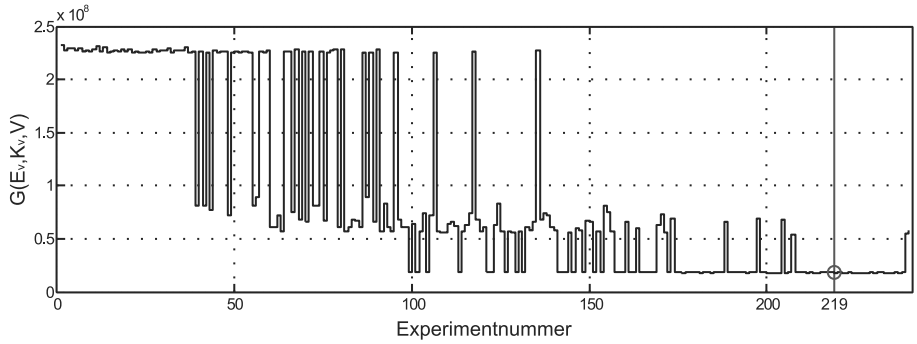


Abbildung 6: *Ergebnisse der Prozesskettenuntersuchung.*

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der klassischen Vorgehensweise der Modellierung und Simulation fertigungstechnischer Prozessketten wurde die Beherrschung der Variantenvielfalt als gravierendes Problem identifiziert. Aufbauend auf dem System Entity Structure/Model Base (SES/MB) Framework wurde ein Lösungsansatz entwickelt. Methodisch basiert dieser auf drei grundlegenden Konzepten: (i) Modellierung einzelner Fertigungsverfahren und Organisation der Modelle in einer MB, (ii) Spezifikation aller zulässigen Prozesskettenvarianten (Struktur + Parametrierung) mit einer SES, (iii) Bereitstellung von Methoden zur automatisierten Generierung ausführbarer Simulationsmodelle.

Zur besseren Beherrschung der Parametervielfalt wurde die originäre SES um SES Variablen und SES Funktionen erweitert. Es wurde die grundlegende Umsetzung des SES/MB Frameworks in der MATLAB/SimEvents Umgebung aufgezeigt. Anschließend wurde dessen Kombination mit simulationsbasierten Optimierungsmethoden an einer exemplarischen Prozesskettenuntersuchung demonstriert. Neben klassischen Modellparametern sind auch unterschiedliche Strukturvarianten Bestandteil des Optimierungsproblems.

Zukünftig soll die Methode auf komplette Fertigungsstrukturen angewendet werden. Dazu werden vom Kooperationspartner, der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) an der Universität Bremen, Modelle weiterer Fertigungsverfahren entwickelt. Weiterhin sollen neben den bisher untersuchten Ressourcenarten auch logistische Größen, wie Pufferkapazitäten, Losgrößen usw. mitbetrachtet werden

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Kooperationspartner Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen Abteilung Fertigungstechnik und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Fördernummern: BR 825/62-1 und PA 631/2-1).

Literatur

Hagendorf, O.; Pawletta, T.; Larek, R.: Meta-Model-based Estimation of Optimal System Variants with MATLAB/Simulink. Simulation Notes Europe 22 (2012) 1, S. 7-14.

Hagendorf, O.; Pawletta, T.: A Framework for Simulation Based Structure and Parameter Optimization of Discrete Event Systems. In: Wainer, G.A.; Mosterman, P.J. (Hrsg.): Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications, CRC Press Inc. of Tailor & Francis Group, USA, 2011, S. 199-222

Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Diss., Univ. Kassel, 2007

Larek, R.; Brinksmeier, E.; Pawletta, T.; Hagendorf, O.: Model-Based Planning of Resource Efficient Process Chains Using System Entity Structures. In: Schuh, G.; Neugebauer, R.; Uhlmann, E. (Hrsg.): Future Trends in Production Engineering - Proc. of the 1st Conf. of the German Academic Soc. for Prod. Eng. (WGP), Berlin, 8.-9 June 2011, Springer 2013, S. 361-372

Larek, R.: Ressourceneffiziente Auslegung von fertigungstechnischen Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung. Diss, Univ. Bremen, 2012

März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Springer 2011

Neugebauer, R.: Energieeffizienz in der Produktion, Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. Fraunhofer Gesellschaft, 2008

Schmidt, A.: Entwicklung eines Simulators zur energetischen Bewertung von Prozessketten der spanenden Bauteilfertigung mit MATLAB/SimEvents. Master-Thesis, Hochschule Wismar, 2012

Schwatinski, T.; Pawletta, T.: Ontologische Modellierung und Modellgenerierung in der MATLAB/Simulink Umgebung: Die „Tiny SES Toolbox“. In: Reichardt, R. (Hrsg.): ASIM-Treffen STS/GMMS 2013 - ARGESIM Report 41, Düsseldorf, 28.2-1.3 2013, ARGESIM/ASIM Pub. TU Vienna, 2013, S. 57-64.

Schwatinski, T.; Schmidt, A.; Pawletta, T.: Tiny SES Toolbox., Website 2012, http://www.mb.hs-wismar.de/cea/SES_Tbx/sesToolboxMain.html

Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Diss., TU Berlin, 2010

Zeigler, B.P.; Hammonds, P.: Modeling and Simulation-Based Data Engineering. Elsevier Academic Press, 2007

Zeigler, B.P.; Praehofer, H.; Kim, T.G.: Theory of Modeling and Simulation. Second Edition, Elsevier Academic Press, 2000

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Konzept eines simulationsbasierten Assistenzsystems zur Risikoabsicherung in Großprojekten – Am Beispiel des Großanlagenbaus und der Bauindustrie

Using simulation-based assistance systems for risks-integrated planning and control of large-scale projects e.g. in the fields of plant engineering or construction industry

Axel Wagenitz, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg (Germany), Axel.Wagenitz@haw-hamburg.de

Jan Cirullies, Christian Schwede, Ulrike Beißert, Fraunhofer IML, Dortmund (Germany), jan.cirullies@iml.fraunhofer.de, christian.schwede@iml.fraunhofer.de, ulrike.beissert@iml.fraunhofer.de

Abstract: Execution of large-scale projects in plant engineering and construction industry is attended by a multitude of risk of unknown dimension. Whenever risks occur during execution of large-scale project they cause remarkable delay of processes as well as costs increase. Currently, no cost and time efficient approach exists, which allows a transparent evaluation of effects on the current project planning and its execution caused by changes of the project conditions. Within this paper the requirements of such an approach are specified and existing approaches analyzed. In the end a concept is presented that allows a risk-based evaluation of execution plans using discrete event simulation.

1 Problemstellung

Die Ausführung von Großprojekten geht einher mit einer Vielzahl von Risiken unbekannten Ausmaßes, die im Projektablauf eintreten und zu erheblichen Verzögerungen bzw. Kostensteigerungen führen können: Der Aufbau des Mautsystems „Toll Collect“ dauerte das Dreifache der veranschlagten 14 Monate, die Oper von Sydney kostete 102 statt geplanter 7 Millionen australischer Dollar (Jakoby 2010, S. 4-5) – und für den Bau des Flughafens Berlin-Brandenburg (BER) ist bislang kein Ende absehbar. Bei Vorhaben dieser Größenordnung ist der erforderliche Aufwand bezüglich Zeit, Kosten, Personen und sonstigen Ressourcen im Vorfeld, aufgrund der vorhandenen Risiken, nur schwer kalkulierbar.

Demgegenüber finden sich Beispiele für eine sehr erfolgreiche Projektdurchführung, wie die Baumaßnahmen rund um die Olympischen Sommerspiele 2012 in London, mit über 600 „Baustellen“ (Grewe 2013, S. 33), die vier Monate vor dem Zeitplan und unter dem Budget abgeschlossen wurden. Ein nach außen hin sichtbarer Unterschied in der Projektplanung zwischen Olympia 2012 und BER ist, dass bei Olympia 2012 die Risiken vor Projektbeginn realistisch eingeschätzt und entsprechende Rückstellungen (2,8 Mrd £ bei einem „Ausführungsbudget“ von 6,3 Mrd. £, Grewe 2013, S. 19) gegen diese Risiken vorgehalten wurden. Die Projektpläne wurden im Rhythmus von vier Wochen aktualisiert und an die Projektbeteiligten kommuniziert. Die Planungsarbeit wurde hier durch eine marktgängige Projektplanungssoftware unterstützt.

Das Beispiel der Planung und Umsetzung der Olympischen Spiele 2012 zeigt, dass eine strikte Anwendung bekannter Prinzipien des Projektmanagements unter Verwendung von marktgängiger Software dazu beitragen kann, auch sehr große Projekte im Zeit- und Kostenbudget abzuwickeln. In der Regel ist hier jedoch ein hoher Personalaufwand erforderlich (Grewe 2012, S. 8), will man häufiger als bislang üblich die Planung in Großprojekten an veränderte Rahmenbedingungen anpassen. Aktuell fehlt es an einem geeigneten Ansatz, der die Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen der Projektplanung und -durchführung effizient transparent macht.

Im Anlagenbau finden wir eine dem Bauwesen ähnliche Produktionscharakteristik. Auch hier zeichnen sich die Produkte durch eine hohe Kundenindividualität aus, typische durchschnittliche Auftragsdurchlaufzeiten betragen 2-3 Jahre, i.d.R. sind während der Projektdurchführung viele Änderungswünsche der Kunden zu berücksichtigen, viele Prozesse laufen parallel bzw. phasenübergreifend ab und werden von vielen Faktoren beeinflusst.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags soll zu dieser skizzierten Problemstellung ein Assistenzsystem konzeptioniert werden, welches Planende und Ausführende von Großprojekten in einem risikoorientierten Projektmanagement unterstützt. Das Assistenzsystem soll im Rahmen der Projektplanung und Steuerung Planende zu einer schnellen Risikobewertung der aktuellen Projektplanung befähigen und eine fundierte Entscheidung für eine Planungsalternative unterstützen. Damit liegt der Fokus der angelegten Risikobetrachtung zunächst auf denjenigen Risiken, welche mit direkten Auswirkungen auf die Prozessausführung einhergehen, d.h. in einer zeitlichen Verschiebung von Prozessen, der Verkürzung bzw. Verlängerung der Prozessdauern resultieren. Nachfolgend werden die Anforderungen an ein geeignetes Planungskonzept entwickelt, existierende Ansätze und Werkzeuge gesichtet und unter Verwendung bestehender Forschungsbeiträge ein Konzept für ein solches System abgeleitet. Für die erste Stufe des Konzeptes wird die Umsetzung an einem Beispiel vorgestellt.

2 Anforderungsableitung und Stand der Forschung

2.1 Begriffsdefinition im Projektmanagement

Großprojekte: Im Betrachtungsraum dieses Beitrags stehen Großprojekte insbesondere in den Bereichen Großanlagenbau und Bauindustrie. Während für den

Begriff „Projekt“ vielfältige Definitionen existieren, siehe PMBOK (2013), gibt es für den Begriff „Großprojekt“ hingegen keine allgemein anerkannte Definition. Als Charakteristika sollen daher hier eine Projektdauer von über einem Jahr, mehrere beteiligte Unternehmen und über 5.000 geplante Einzeltätigkeiten angenommen werden.

Risiko: Der Risikobegriff wird international standardisiert und ohne spezielle Einordnung in eine Branche oder einen Kontext durch die ISO-Norm 31000 festgelegt und als „Effekt der Unsicherheit auf die Ziele” verstanden. Dieser Effekt, d.h. die „Abweichung vom Erwarteten“, kann positiv und/oder negativ ausfallen. „Unsicherheit“ beschreibt einen Informationsmangel, aufgrund dessen es an Verständnis oder an Wissen zu einem Ereignis, dessen Konsequenz oder Wahrscheinlichkeit fehlt. In Bezug auf das Projektmanagement kann die Definition der ISO-Norm adaptiert werden (Gareis 2006, S. 91). Nach Gareis (2006) lassen sich die Abweichungen beispielsweise an der Projektleistung, den -terminen, den -kosten oder den -erträgen festmachen.

Risikoaggregation: Um die Bedeutung einzelner Risiken nicht unabhängig von anderen Risiken zu beurteilen und so zu einem in der Gesamtheit adäquaten Ergebnis zu kommen, ist die Aggregation von Risiken erforderlich (Hempel und Offerhaus 2008, S. 12). Den Begriff der Risikoaggregation definiert ebenfalls die ISO Norm 31000, nämlich als „Zusammenführung einer Vielzahl von Risiken zu einem Risiko zur Entwicklung eines vollständigeren Verständnisses des Gesamtrisikos” (ISO 2009, S. 9).

2.2 Anforderungen an die Methodik

Folgt man dem Beispiel von Olympia 2012 und der Empfehlung von Scholl und Domschke (2005, S. VI), die Planungen „komplexer realer Systeme“ anhand eines Modells vorzunehmen, stehen Planende von Großprojekten vor beachtlichen Herausforderungen hinsichtlich des Aufwands zur Abbildung von Prozessen und ihrer Interdependenzen, der Speicherung und Verarbeitung der anfallenden Datenmenge sowie der Notwendigkeit zur regelmäßigen Plananpassung bei Planänderungen oder Störereignissen (Grewe 2012, S. 9).

In der Literatur aus der Bauindustrie sowie dem Anlagenbau finden sich bereits unterschiedliche Ansätze zur modellbasierten Planung von Projekten, die hinsichtlich der Herausforderungen bei Großprojekten evaluiert und zu Anforderungen an die Planungsmethodik zusammengefasst wurden. Für die modellbasierte Ablaufplanung und das Controlling von Bauprojekten leitet Beißert (2011, S. 6) nachfolgende Anforderungen an eine Methodik ab. Diese sollte

A1. Möglichkeit zur intensiven Untersuchung des Lösungsraumes für Planungsvarianten bieten, da es sich um ein kombinatorisches Problem mit einer Vielzahl an gültigen Lösungen handelt,
A2. Planungen auf einem hohen Detaillierungsgrad zulassen, um die vielfältigen Abhängigkeiten abzubilden und damit den Lösungsraum weitestgehend aufzuspannen sowie
A3. schnelle Modellanpassung an neue Bedingungen ermöglichen, um die Vielzahl an Planänderungen im Projektverlauf zeitnah in die Planung zu integrieren.

Aus den Erfahrungen des BMWi-geförderten Verbundprojektes InKoRISK (http://inkorisk.research4.eu/) zum kollaborativen Risikomanagement und einem

internen Forschungsprojekt des Fraunhofer IML zur Projektplanung im Großanlagenbau (Yüzgülec et al. 2010) konnten als weitere Anforderungen

A4. eine speichereffiziente Modellierung ermöglichen aufgrund der Vielzahl von Prozessen und ihrer Abhängigkeiten untereinander sowie
A5. Frühzeitiges Erkennen und (monteäre) Quantifizierung des Umfangs und der Auswirkungen erkannter Risiken, für eine transparente Bewertung der Projektplanung
A6. Unterstützung der Planer bei der Generierung von Alternativszenarien zur schnellen Identifikation und Untersuchung geeigneter Maßnahmen bei Risikoeintritt

abgeleitet werden. Den Anforderungen A3 und A5 schließt sich Medgenberg und Nemuth (2011, S. 158) im Hinblick auf die Implementierung eines Risikomanagements in Unternehmen an. Einen Schritt weiter gehen Wagner und Scherer (2008, S. 163) mit ihrer Forderung nach einem integrierten System zur Überwachung, Simulation, Steuerung, Controlling und dem Risikomanagement bei einem stetigem Übergang zwischen den horizontalen Anwendungsdimensionen sowie den vertikalen Granularitätsebenen.

Im Folgenden wird ein Modellierungsansatz gesucht, der die erarbeiteten Anforderungen A1-A6 möglichst umfassend erfüllt.

2.3 Modelle und Methoden zur Prozessplanung

Für das Management von Projekten existieren verschiedene Methoden und Planungsmodelle z. B. zur Strukturanalyse und der zeitlichen Ablaufplanung (Rinza 1998), deren gemeinsames Ziel darin besteht, die Komplexität der Planung schrittweise zu zerlegen und diese so handhabbar zu machen.

Die zeitliche Ablaufplanung steht im Vordergrund vorliegender Betrachtung. Dafür geeignete Methoden stellen Anordnungsbeziehungen zwischen den einzelnen Teilprozessen her, d. h. sie beschreiben eine „quantifizierbare Abhängigkeit zwischen Ereignissen und Vorgängen“ (DIN 69900 2009). Zu den am weitest verbreiteten Methoden zählt die Netzplantechnik, der die Methoden Critical Path Method, die Metra-Potenzial-Methode oder die Program Evaluation and Review Technique (PERT) zugeordnet werden können (Corsten et al. 2008; Jakoby 2010). Im vorliegenden Kontext bietet PERT als einzige der genannten die Möglichkeit zur Berücksichtigung der Planungsunsicherheit im Projekt, indem wahrscheinlichkeitsverteilte Durchlaufzeiten, Kapazitäten und Ressourcen für einzelne Prozesse im Projekt hinterlegt werden können. Die PERT-Methode wurde bereits 1968 bei der Planung der Olympischen Spiele in Grenoble eingesetzt (Grenoble 1968, S. 26). Die Anforderung hinsichtlich einer intensiven Untersuchung des Lösungsraumes nach adäquaten Planungsvarianten sowie eine schnelle Modellanpassung an neue Bedingungen und Unterstützung bei der Bewertung der Auswirkungen werden durch PERT ähnlich zu den anderen Netzplantechniken nicht abgedeckt.

Der Einsatz von Simulationsmodellen zur Untersuchung komplexer Probleme mit einer Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Parameter hat sich in der Theorie bewährt (AbouRizk 2010; Beißert 2011; Medgenberg und Nemuth 2011; VDI 3633 2010).

Unter den verschiedenen Ausprägungen von Simulationsmodellen ist die ereignisdiskrete Simulation (discrete-event simulation, DES) besonders für planerische als auch logistische Prozesse geeignet (Hlupic und Robinson 1998; AbouRizk 2010; Jahangirian et al. 2010). Aufbauend auf den Techniken zur zeitlichen Ablaufplanung (s.o.) ermöglicht diese Methode die Handhabung hoher Komplexitätsgrade einschließlich der damit einhergehenden großen Datenmengen sowohl bei der Modellierung als auch während der Berechnung. Zudem berücksichtigt DES dynamische Effekte, sodass sich zeitlich begrenzte Störungen wie Ressourcenengpässe identifizieren und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge erkennen lassen (Cho und Eppinger 2005).

Scherer und Ismail (2011, S. 1) weisen jedoch darauf hin, dass die Simulation heutzutage in der Praxis nur wenig Anwendung findet. Als Gründe werden zu große Komplexität („lack of simplicity"), zu hoher Zeit- und Kostenaufwand sowie zu hoher Qualifikationsbedarf beim Personal angegeben. Der Anforderung A3 wird aufbauend hierauf eine besonders hohe Bedeutung zur Erreichung der Akzeptanz von Lösungen in der Praxis eingeräumt.

Zur simulationsgestützten Bewertung von Planungen werden in PMBOK (2013), beispielhaft, „What-if Senario Analysis" und „Simulation" benannt. Im Bereich der Simulation benennt das PMBOK die „Monte-Carlo-Simulation" als am weitesten verbreitete Methode zur Bewertung von Projektablaufplänen.

2.4 Tools zur Bewertung von Projektplänen

Simulation wird in unterschiedlichen Fachdisziplinen zur Untersuchung komplexer Fragestellungen genutzt. Beißert (2011, S. 28) und Dori und Borrmann (2010, Forschungsprojekt ForBau) wählen einen constraint-basierten Simulationsansatz mit dem Ziel der rechnergestützten Berechnung gültiger Pläne unter Berücksichtigung der relevanten Randbedingungen (Constraints) von Prozessen. Obwohl dieser Ansatz für überschaubare Problemgrößen sehr gute Ergebnisse zeigt, wird insbesondere für Großprojekte nicht die geforderte kurze Anpassungszeit an neue Randbedingungen erreicht – die Modellanpassung ist sehr aufwändig (vgl. Anforderung A3). Dori und Baumann setzen im Forschungsprojekt ForBau (www.forbau.de) ebenfalls Simulation zur Absicherung von Baumaßnahmen speziell im Tiefbau ein, um verschiedene Szenarien vor der Bauausführung durchzuspielen und zu bewerten. Die Berücksichtigung von Risiken ist in beiden Konzepten nicht vorgesehen (vgl. Anforderung A5).

Hienz und Flemming (2010) entwickeln im Rahmen des Mefisto-Projektes (www.mefisto-bau.de) einen Ansatz zum Multimodell-basierten Risikomanagement, welcher die simulationsgestützte Evaluation von Risikozuständen ermöglicht. Im Fokus der Entwicklung liegen die Evaluation der Projekteinzelrisiken zur Ermittlung der wahrscheinlichen Projektkosten und ihre Überprüfung im Projektverlauf. Im Rahmen von Mefisto konnte eine umfassende Methodik zum Risikomanagement von Bauprojekten entwickelt werden. Diese stellt jedoch eine branchenspezifische Lösung dar, zugeschnitten auf die spezifischen (Teil-)Modelle des Bauwesens. Der hier vorliegende Ansatz verfolgt die Entwicklung einer branchenunabhängigen, effizienten Lösung zur verbesserten Planung von Risiken bei Großprojekten, so dass die vorliegende Lösung nicht übertragbar ist. Darüber hinaus soll in vorliegender Arbeit ein Ansatz entwickelt werden, der Planer im Rahmen der Projektsteuerung in

der Entwicklung von Alternativszenarien aktiv unterstützt (A6), eine Forderung, welche mit Mefisto nicht adressiert ist. Weitere Arbeiten zum simulationsgestützten Risikomanagement fokussierten auf die Umsetzung und Analyse von Risiken in einem Simulator und sind daher im Hinblick auf die systemtechnische Umsetzung von Softwarelösungen nur bedingt aufschlussreich (Medgenberg und Neumuth 2011; Werner 2003).

Zur aktiven Unterstützung von Planenden werden im Umfeld der Logistik erfolgreich Logistische Assistenzsysteme (LAS) genutzt (Liebler et al. 2013; Klingebiel et al. 2010). LAS sollen die planenden Experten durch geeignete Hilfestellungen in dem Entscheidungsprozess unterstützen. Hierfür werden die Systemfunktionen und Bedienabläufe auf konkrete Aufgaben zugeschnitten und präsentieren dem Benutzer transparente, verständliche und bewertbare Informationen. Den Kern der LAS und damit das Werkzeug zu Untersuchung bildet der Simulator OTD-NET, wobei vor allem die Prozessmodellierungskomponente OTD-InSite verwendet wird. Die vorliegenden Erfahrungen der Autoren mit dem Werkzeug OTD-NET (Wagenitz 2007) zeigen eine sehr gute Abdeckung der genannten Anforderungen. OTD-NET wurde in Projekten zum Risikomanagement sowie zur Projektplanung im Großanlagenbau und in Bauvorhaben eingesetzt: Zur Vorbereitung der für die Olympischen Winterspiele 2014 in Sochi erforderlichen Baumaßnahmen wurde OTD-NET verwendet, um bei der Entwicklung einer Logistikstrategie in Form eines integrierten Vorgehensplans zur rechtzeitigen Fertigstellung des Bauvorhabens zu unterstützen (Klingebiel et al. 2010). Der Fokus der Analysen lag auf dem Ausbau von Straßen, um die nur mithilfe dynamischer Simulation ermittelbaren Risiken etwaiger Engpässe während der Bauphase zu identifizieren.

Zudem steht den Autoren für dieses Werkzeug der Quellcode zur Verfügung, so dass bei Problemen mit zu langen Laufzeiten auch im Werkzeug nach Lösungsmöglichkeiten gesucht werden kann. Die mit diesem Werkzeug gemachten Erfahrungen zeigen aber, dass Modelle mit vielen Millionen Objekten und einem Speicherbedarf von über 30GB (trotz hoher Speichereffizienz) sicher beherrscht werden.

Im folgenden Abschnitt wird ein simulationsbasiertes Konzept vorgestellt, welches zu einer effizienteren Planung von Großprojekten beitragen kann.

3 Simulationsbasierter Ansatz zur risikoorientierten Planung in Großprojekten

3.1 Konzept

Unter den oben genannten Anforderungen beeinflusst, nach Meinung der Autoren, insbesondere die mehr oder weniger ausgeprägte Fähigkeit, geänderte Rahmenbedingungen in eine Projektplanung und damit hier auch in ein Simulationsmodell zu integrieren (Anforderung A2) die praktische Verwendbarkeit eines Planungsansatzes. Um dieser Anforderung zu begegnen, konnte auf Vorarbeiten zurückgegriffen werden, die eine verwandte Aufgabenstellung im Kontext der operativen Planungsunterstützung für Lieferketten der Automobilindustrie löst.

„Logistische Assistenzsysteme“ (LAS) unterstützen Planungsprozesse in drei Schritten (Klingebiel et al. 2010; Bockholt 2012). Im Rahmen der (1) Zustandserfassung wird der aktuelle Zustand der Prozesse des Systems erfasst. Hierbei können unterschiedliche Informationsquellen (vorhandene operative IT-Systeme, manuell erfasste Informationen) integriert werden. Innerhalb der (2) Zustandsbewertung wird der Systemzustand im Hinblick auf im Vorhinein definierte Kennzahlen bewertet, z. B. mittels ereignisdiskreter Simulation. Die (3) Umsetzungsunterstützung ermöglicht die Beobachtung der Ausführung einer getroffenen Entscheidung. Unerwartete Entwicklungen können wiederum bewertet und analysiert werden.

Der im Folgenden dokumentierte erste Schritt zur Umsetzung eines Assistenzsystems zur Unterstützung der Projektplanung von Großprojekten (PMAS – Projektmanagement-Assistenzsystem) leistet die Festlegung von geeigneten Modellelementen, um einerseits eine verbesserte Projektplanung unter Berücksichtigung dynamischer Abhängigkeiten zu erhalten und anderseits die Festlegung eines Datenmodells, welches als Grundlage für ein PMAS dienen und die Daten aus den verschiedenen vorliegenden Informationsquellen integrieren kann. Damit gleicht es einem logistischen Assistenzsystem bezüglich des Zwecks (operative Planungsunterstützung), des konzeptionellen Aufbaus und der benötigten Softwarekomponenten, unterscheidet sich aber durch die zugrundeliegenden Fragestellungen (Projektverlauf gegenüber Lieferkette), die Eingangsdaten und das Datenmodell.

Um die zu definierenden Modellelemente möglichst universell einsetzbar zu gestalten, wurde das weit verbreitete Werkzeug Microsoft Project (unterstützt die Critical-Path-Method, zur Verbreitung vgl. Eastman et al. 2013) analysiert, mit dem Ziel sicherzustellen, dass aus einem MS-Project-Projekt stets ein Simulationsmodell abgeleitet werden kann. So wurde eine minimale Detaillierungsstufe festgelegt, die jedenfalls nicht unterschritten werden darf. Weiterhin liegen auf dieser Detailierungsstufe bereits wichtige Parameter für das Simulationsmodell vor (z. B. Durchlaufzeiten, Vorgänger-, Nachfolgerbeziehungen und etwaige Ressourcenzuordnungen). Über diese Parameter hinaus werden zur Abdeckung der Anforderung A5 Stücklisten als Modellbestandteil umgesetzt, um die Aggregation von Risiken gut abbilden zu können. So kann bei einem Risikoeintritt (Ausfall eines Vormaterials) genau bestimmt werden, welche Prozesse dieses Material benötigen und durch den Risikoeintritt beeinflusst werden.

3.2 Technischer Lösungsansatz

Um das für das PMAS erforderliche Simulationsmodell möglichst einfach erzeugen zu können, wurde die Menge der Simulationsbausteine im verwendeten Werkzeug OTD-NET um zwei Bausteine erweitert: „Prozesse“ und „Ressourcenpool“.

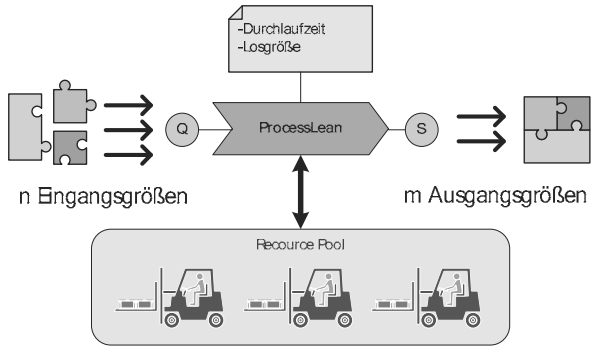


Abbildung 1: *Technisches Konzept*

Die beiden neuen Bausteine „Prozess“ (ProcessLean) und „Ressourcenpool“ (ResourcePool) enthalten genau die oben genannten Parameter: Nachfolger, Durchlaufzeiten (Arbeits- bzw. Betriebszeitmodelle können spezifiziert werden), Ressourcenzuordnungen und Stücklisten. Prozesse transformieren „Entitäten“ unter Verbrauch von Zeit. In „Quellen“ werden Entitäten erzeugt, in „Senken“ „vernichtet“ (Abb. 1). Prozesselemente können untereinander sowie mit Ressourcenpools beliebig verknüpft werden.

In den Stücklisten werden erforderliche Entitäten „Vormaterialien“ und auch Ressourcen spezifiziert. Ein Prozess beginnt, wenn alle erforderlichen Entitäten vorhanden sind und erzeugt wiederum Entitäten. Konkret werden Stücklisten als „Transformationen“ abgebildet. Das Vormaterial kann dabei in einem spezifizierten quantitativen Verhältnis in das Ergebnis der Prozessinformation integriert (als Sub-Entität) werden oder aber verbraucht werden.

Ist eine für die Prozessausführung erforderliche Ressource nicht vorhanden, wird eine Ressourcenanforderung erzeugt (wiederum eine Entität) und an einen der spezifizierten Ressourcenpools verschickt. Hält der Ressourcenpool die angefragte Ressource grundsätzlich vor (Typ des Pools), wird die Anforderung in eine Warteschlange gestellt. Diese Warteschlange wird nach dem Muster first-in-first-out abgearbeitet. Das Ergebnis der Prozessbearbeitung wird an einen Nachfolger weitergereicht. Hier werden als Nachfolger nur Prozesse oder sog. „Routingtabellen“ verwendet, die Entitäten auf mehr als einen Nachfolger nach bestimmten Regeln verteilen. In den PMAS Modellen werden insgesamt lediglich fünf Typen von Bausteinen eingesetzt. Ressourcen unterscheiden sich nur insoweit von anderen Entitäten, dass diese auch dann in den Ressourcenpool zurückgesandt werden, wenn kein Weg in diesen Pool spezifiziert wurde.

4 Überprüfung des Konzeptes

Um festzustellen, ob die Unterstützung von Projektplanungsarbeiten durch ein PMAS auf Basis eines OTD-NET-Simulationsmodells sinnvoll ist, wurde zunächst eine einfache Projektplanung auf der Basis von MS Project implementiert und für dasselbe Planungsszenario schließlich ein Simulationsmodell erstellt.

Szenario (Risikoeintritt)				Risikofolge (Verzögerung/ Kosten)
Nr.	Betroffener Prozess	Risiko	Eintrittswahr-scheinlichkeit	
Szenario 1	Anlieferung Motor	schlechte Qualität	25%	5 Werktage
Szenario 2	Anlieferung Exzenterwelle 4	verzögerter Liefertermin	45%	15 Werktage
Szenario 3	Boden ausheben	schwankende Prozessdurchlaufzeit	5%	13 Werktage
Szenario 4	Säge 1 umrüsten	schwankende Prozessdurchlaufzeit	45%	10 Werktage
Szenario 5	Schmiede auf Funktion testen	Ressourcenausfall (Betriebsingenieur A)	55%	3 Werktage
Szenario 6	Szenario 1 - Szenario 5	s.o.	45%	46 Werktage
Szenario 7	Anlieferung Gehäuse	verzögerter Liefertermin	30%	12 Werktage
Szenario 8	Anlieferung Getriebe	schlechte Qualität	45%	17 Werktage
Szenario 9	Abstimmung Schmiede und Schlitten 2	Ressourcenausfall (Elektro-Techniker A)	60%	5Werktage
Szenario 10	Szenario 6 - Szenario 9	s.o.	55%	80 Werktage

Abbildung 2: *Untersuchte Szenarien*

Als Projektbeispiel soll exemplarisch der Aufbau einer neuen Schmiedeanlage, für die Produktion gewalzter Rohre in einem Rohrwerk, herangezogen werden. Da in der Praxis das größte Interesse hinsichtlich eines möglichen, testweisen Einsatzes des Anlagenanlaufintegrators zur Planung und Durchführung der Phasen „Montage“ und „Inbetriebnahme“ zu verzeichnen war, fokussierte sich das Anwendungsmodell ebenfalls auf die letzten Phasen des Anlagenanlaufs.

Betrachtet wurde eine Radialschmiede, die mit vier Hämmern zum Umformen von Stahlrohren dient. Die Stückliste der aufzubauenden Schmiedeanlage besteht aus folgenden Komponenten: ein Motor, ein Getriebe, vier Exzenterwellen, ein Gehäuse, zwei Schlitten (am Ein- und Ausgang) und ein Führerhaus. Ferner waren zum Aufbau der Schmiedeanlage verschiedene Vorarbeiten notwendig. Neben dem Montageprozess werden im Rahmen der Untersuchung auch vorgelagerte Prozesse berücksichtig wie Genehmigung eingeholt, Erstellung Anlagenfundament mit einem Volumen von ca. 9500 m^3. Des Weiteren musste eine Säge für den Zuschnitt des Vormaterials angepasst werden sowie bei der Inbetriebnahme der Anlage verschiedene Schnittstellen- und Funktionstests durchlaufen und Mitarbeiter geschult werden.

Um die für die Planung von Großprojekten wichtige Abbildung von Risiken zu untersuchen, wurden in zehn Szenarien (s. Abb. 2) Risiken der Kategorien Prozess, Ressourcen, Qualität und Beschaffung betrachtet.

Die Vorteile des Simulationseinsatzes sind bereits bei solch kleinen Modellen erkennbar. Unter Verwendung des beschriebenen Modells wurden verschiedenen Szenarien mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation mit 10.000 Simulationsläufen untersucht. Im Rahmen der Untersuchung traten die Risiken mit ihrer definierten Eintrittswahrscheinlichkeit auf. Die Auswirkungen der Risiken auf die Durchlaufzeiten der Teilprozesse wurden ermittelt und für jeden Simulationslauf die Gesamtdurchlaufzeit des Projektes berechnet. Diese Ergebnisse lassen die

Wahrscheinlichkeit für das Erreichen eines bestimmten Terminzieles berechnen (Abbildung 3) und bieten den Planenden eine höhere Sicherheit hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit der Einhaltung zugesicherter Termine und auch Kosten eines Projekts.

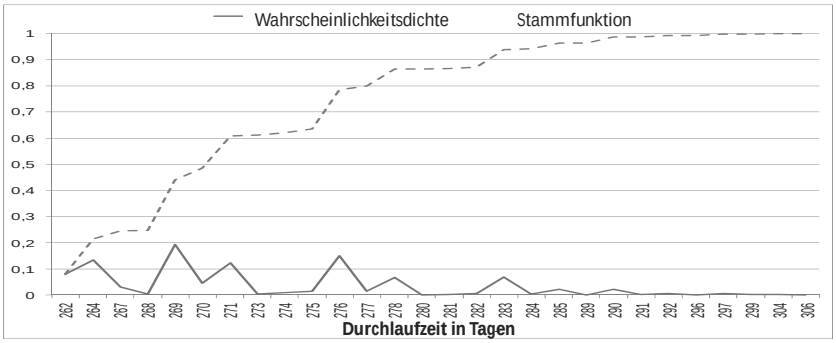


Abbildung 3: *Durchlaufzeiten Prozesse*

Es konnte im Anwendungsbeispiel gezeigt werden, dass die Verwendung eines Simulationsmodells einer einfachen Handhabung eines Projektplanungswerkzeugs nicht im Wege steht und somit eine Grundlage schafft, schnell risikoorientierte Untersuchungen durchzuführen. Die Abbildung von Risiken in der Simulationsumgebung ist ohne Schwierigkeiten umsetzbar. Durch Veränderung der Verteilungsfunktion zur Ermittlung der Durchlaufzeit eines Vorprozesses kann ein Einzelrisiko in Bezug auf Vormaterialverfügbarkeit spezifiziert werden. Die Verwendung von Stücklisten erlaubt nach Anwendung der Monte-Carlo-Simulation eine deutlich verbesserte Analyse der Korrelation der Einzelrisiken. Neben den leicht erkennbaren potenziellen Auswirkungen einer verzögerten Lieferung von Vormaterial (z.B. „Exzenterwelle 3“) werden auch indirekte Folgen wie eine verzögerte Beanspruchung von Personalressourcen und deren Auswirkungen erkennbar.

Im Vergleich hierzu zeigten sich bei der Abbildung der Risiken und der Berechnung der Gesamtdurchlaufzeit in MS Project deutliche Nachteile ggü. der betrachteten Methodik. So werden Eintrittswahrscheinlichkeiten für Risiken nicht sinnvoll unterstützt, ebenso die Betrachtung der Korrelation der Einzelrisiken. Darüber hinaus sind die Ableitung von Szenarien und der Vergleich der Ergebnisse vergleichsweise aufwändig. In der Simulationsumgebung ist die Abbildung von Risiken hingegen ohne Schwierigkeiten umsetzbar. Der Zeitbedarf für die Modellanpassungen zur Spezifikation der Szenarien 1-10 lag jeweils bei bis zu fünf Minuten. Es kann also festgestellt werden, dass der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz schnelle Modellanpassung und Szenarienuntersuchung ermöglicht.

5 Fazit

Die Planung von Großprojekten ist sehr herausfordernd. Das Beispiel der Planung und Umsetzung der Olympischen Spiele 2012 zeigt jedoch, dass eine strikte Anwendung bekannter Prinzipien des Projektmanagements unter Verwendung von

marktgängiger Software personalintensiv aber hinreichend sein kann, um auch sehr große Projekte im Zeit- und Kostenbudget abzuwickeln.

In der hier vorgestellten Arbeit wurde untersucht, ob das Konzept der logistischen Assistenzsysteme (LAS) auf die Projektplanung von Großprojekten übertragen werden kann, um Planende ein Projektmanagement Assistenzsystem (PMAS) zur Verfügung zu stellen. Das PMAS soll einerseits eine Senkung des Aufwands für die regelmäßige Aktualisierung des Projektplans und andererseits eine Erhöhung der Qualität der Bewertung der Planung hinsichtlich Prozessrisiken zu ermöglichen.

Die Abdeckung der dargestellten Anforderungen durch das PMAS soll abschließend diskutiert werden. Anforderung A2 kann durch die Verwendung von Simulation, welche in der Bewertung komplexer Modelle anderen Verfahren überlegen ist, als erfüllt angesehen werden. Der verwendete Simulator OTD-NET liefert eine parametrierbare Bausteinbibliothek, damit ist die Anforderung A3 nach einer schnellen strukturellen Modellanpassung an neue Bedingungen bereits jetzt möglich. Eine vereinfachte Integration von bereits elektronisch vorliegenden Informationen soll zukünftig durch die vollständige Umsetzung des LAS-Konzeptes im diskutierten Einsatzbereich abgedeckt werden. Auch die Anforderung A4 an eine speichereffiziente Modellierung wird vom Werkzeug OTD-NET erfüllt. Die Speicherstrukturen sind für die Simulation von Produktionsnetzwerken von Automobilkonzernen mit der vollständigen Abbildung der Produktstruktur über das gesamte Produktspektrum ausgelegt. Auch sehr große Modelle im Großanlagenbau können daher mit hoher Wahrscheinlichkeit im Hauptspeicher abgelegt werden. Die Anforderung A5 wurde bereits durch Vorarbeiten der Autoren im Forschungsprojekt InKoRISK in die Modellelemente des Werkzeugs OTD-NET integriert.

Die verbleibende Anforderung A1, für deren Erfüllung eine intensive Untersuchung des Lösungsraums erforderlich ist, lässt sich gerade in Anbetracht des großen Lösungsraums bei der Planung von Großprojekten als nicht überzeugend abgedeckt bewerten. Bei komplexen Problemstellungen scheiden alternative Methoden zur Simulation (z. B. Optimierungsansätze) aber oft aus, so dass die Anforderung als „relativ gut erfüllt“ angenommen wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Konzept der automatisierten Zusammenführung von projektablaufrelevanten Informationen zusammen mit der simulationsbasierten Bewertung großes Potenzial für die verbesserte Projektplanung in Großprojekten aufweist, da neben einer hohen Ergebnisqualität eine Vereinfachung der Planung erreicht wird.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projektes „InKoRISK – Integrierte Terminierung und Transportplanung unterstützt durch kollaboratives Risikomanagement in der Automobilindustrie“, das von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Kennzeichen 19 G 11003D gefördert wird.

Literatur

AbouRizk, S.: Role of Simulation in Construction Engineering and Management. Journal of Construction Engineering and Management 136 (2010) 10, S. 1140-1153.

Beißert, U.: Constraint-basierte Simulation zur Terminplanung von Ausführungsprozessen – Repräsentation baubetrieblichen Wissens mittels Soft Constraints. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Fachgebiet Bauingenieurwesen 2011.

Bockholt, F.: Operatives Störungsmanagement für globale Logistiknetzwerke – Ökonomie- und ökologieorientiertes Referenzmodell für den Einsatz in der Automobilindistrie. Dissertation, Praxiswissen Dortmund, Fachgebiet Maschinenbau 2012.

Cho, S.-H.; Eppinger, S. D.: A simulation-based process model for managing complex design projects. IEEE Transactions on Engineering Management 52 (2005) 3, S. 316-328.

Corsten, H.; Corsten, H.; Gössinger, R.: Projektmanagement. Einführung. München, Oldenbourg 2008.

DIN 69900, 2009: Projektmanagement. Netzplantechnik. 2009.

Domschke, W.; Scholl, A.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht, 3. Auflage. Berlin, Heidelberg; New York: Springer 2005.

Dori, G.; Borrmann, A.: Bauablaufsimulation und -animation für die Planung von Brückenbauvorhaben. Tagungsband des 22. Forum Bauinformatik. Berlin 2010.

Eastman, C; Teicholz, P.; Sacks, R.; Liston, K.: BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. New Jersey, Wiley Publishing 2013.

Gareis, R.: Risikomanagment in Projekten. Wirtschaft und Management, Jahrgang 3 (2006) 3, S. 89-100.

Grenoble: Xeme Jeux Olympiques d'Hiver: Grenoble 1968. Official Report Grenoble 1968.

Grewe, K.: Das Projektmanagement der Olympischen Spiele 2012 in London. Angenommen zur Veröffentlichung von ProjektMagazin, 01.2012.

Grewe, K.: Internationale Grossprojekte in Time and Budget: Das Beispiel Olympiade London 2012, PRINCE2®-Tag Deutschland - Experten-Tagung für Projektmanagement, Köln (Deutschland), 25. April 2013.

Hempel, M.; Offerhaus, J.: Risikoaggregation als wichtiger Aspekt des Risikomanagements. In: Deutsche Gesellschaft für Risikomanagement (Hrsg.): Risikoaggregation in der Praxis. Beispiele und Verfahren aus dem Risikomanagement von Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 3-13.

Hlupic, V.; Robinson, S.: Business process modelling and analysis using discrete-event simulation. In: Medeiros D. J.; Watson E. F.; Carson J. S.; Manivannan M. S. (Hrsg.): Winter Simulation Conference proceedings, Washington, D.C. Omnipress, New York: Association for Computing Machinery, 13-16. December, 1998, .

Hienz, R.; Flemming, C.: Modellbasiertes Projektcontrolling und Risikomanagement. In: Scherer, R. J.; Schapke, S.-E. (Hrsg.): MEFISTO:

Management – Führung – Information – Simulation im Bauwesen 2010 Tagungsband 1. Mefisto Kongress, Dresden (Deutschland), 21. Oktober 2010.

ISO 31000:2009, Riskmanagement – Principles and guidelines, 2009.

Jahangirian, M.; Eldabi, T.; Naseer, A.; Stergioulas, L. K.; Young, T.: Simulation in manufacturing and business. A review. European Journal of Operational Research 203 (2010) 1, S. 1-13.

Jakoby, W.: Projektmanagement für Ingenieure. Gestaltung technischer Innovationen als systemische Problemlösung in strukturierten Projekten. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010.

Klingebiel, K.; Toth, M.; Wagenitz, A.: Logistische Assistenzsysteme. In: Praxishandbuch Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungsunternehmen, Abschnitt 2.2.10, Fachverlag Deutscher Wirtschaftsdienst, 2010a.

Klingebiel, K.; Gavrylenko, Y.; Wagenitz, A.: Adoption of Simulation Techniques for Mastering Logistic Complexity of Major Construction and Engineering Projects. In: Bargiela, A.; Crowley S.A.A.D.; Kerckhoffs E.J.H. (Hrsg.): Proceedings of the 24th European Conference on Modelling and Simulation, Kuala Lumpur (Malaysia), 1.-4. Juni 2010b, S. 160-168.

Liebler, K.; Motta, M; Beißert, U.; Wagenitz, A.: Introduction OTD-NET and LAS: Order-to-delivery network simulaiton and decision support systems in complex production and logistics networks. Proceedings of Winter Simulation Conference, Washington, D.C., (USA), 8.-11. Dezember 2013 (accepted paper).

Medgenberg, J.; Nemuth, T.: Potential der Monte-Carlo-Simulation für Risikoanalyse im Projektmanagement. 1. Internationaler BBB-Kongress, Dresden (Deutschland), 12. September 2011, S. 153-171.

PMBOK: A Guide to the Project Management Body of Knowledge, 5. Auflage, Project Management Institute, 2013.

Rinza, P.: Projektmanagement – Planung, Überwachung und Steuerung von technischen und nichttechnischen Vorhaben. Berlin, Heidelberg: Springer 1998.

Scherer, R.; Ismail, A.: Process-based simulation library for construction project planning. In: Jain, S.; Creasey, R.R.; Himmelspach, J.; White, K.P., Fu, M. (Hrsg.): Proceeding of the Winter Simulation Conference (WSC), Phoenix, Arizona (USA), 11.- 14. December 2011.

Yüzgülec, G.; Wagenitz, A.; Heller, T.: Risikomanagement-Tool für einen erfolgreichen Anlagenanlauf. Productivity Management 3 2010, S. 27-30.

VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen (Entwurf), 2010.

Wagenitz, A.: Modellierungsmethode zur Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie. Dissertationsschrift TU Dortmund, Fachgebiet Maschinenbau, 2007.

Wagner, U.; Scherer, R.: Konzeption eines Werkzeugs für schnell zu erstellende Simulationen von Baustellenabläufen. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IBR Verlag, 2008, S. 161-168.

Werner, A.: Datenbankgestützte Risikoanalyse von Bauprojekten – Eine Methode zur rechnergestützten Monte-Carlo-Simulation des Bauablaufs für die Risikoanalyse im Bauunternehmen. Dissertationsschrift Universität Rostock, Fachgebiet Ingenieurwissenschaften, 2003.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

A Petri net-based simulation model for the flexible modelling and analysis of building construction processes

Petri-Netz-basiertes Simulationsmodell zur flexiblen Modellierung und Analyse von Bauprozessen im Hochbau

Kais Samkari, Volkhard Franz, Universität Kassel, Kassel (Germany),
ksamkari@uni-kassel.de, vfranz@uni-kassel.de

Abstract: This paper suggests the combination of a component-type-based modelling approach with a Petri net modelling approach to analyse and simulate the shell works of a building construction project. This approach preserves the flexibility in modelling the construction processes at the level of a building component type. In addition, it benefits from the Petri net-based analysis methods to examine the static and dynamic behaviour of the system. After describing the models, the paper maps the process model onto the Petri net model. Then, a method for generating a Petri net that represents the project network from the process data of the project is described in detail. Finally, an application to a practical example is examined and discussed.

1 Introduction and background

The use of a simulation approach in building construction management concerns the efficient analyses of construction processes before and during construction. Despite significant advances in the application of simulation in the field of construction planning, an attempt to find an economical execution plan of a large-scale building construction project using simulation is still not an inexpensive endeavour. In order to plan using simulation there are two aspects of the simulation approach that should not be underestimated. On the one hand, the approach should provide a high flexibility to model and change the processes of the construction project being investigated. On the other hand, it should examine in detail the static and dynamic behaviour of the modelled construction processes.

Several studies have revealed that a component-type-based process modelling approach can achieve a high level of flexibility in modelling construction processes, as it reduces the effort of specifying the technological and spatial dependency relationships among construction activities (Aalami and Fischer 1998, Huhnt and

Enge 2006, Kugler 2012). One question that needs to be asked, however, is how the model's analysis properties such as *reachability* and *liveness* are checked.

Several studies investigating the use of Petri nets to analyse and simulate the dynamic behaviour of complex construction processes have been carried out (Franz 1989, van der Aalst 1996, Sawhney 1997, to name a few). These studies have demonstrated that the use of a Petri net is very reasonable, since it can be effectively used in modelling the structure and behaviour of complex stochastic systems (such as a construction project) at an abstract level. Further, Petri nets have a firm mathematical foundation that has resulted in an abundance of analytical methods that can be used to analyse many properties and problems associated with concurrent systems (Murata 1989). Modelling difficulties arise, however, when an attempt is made to manipulate the structure of a Petri net by a non-specialist.

This paper will focus on a modelling approach that combines a component-type-based process model and a Petri net model. While the component-type-based process model is the interface to the user, the Petri net model is the interface to the simulation environment. Section 2 describes the process model and the Petri net model, and section 3 introduces the mapping concept. Section 4 describes a method to generate the Petri net automatically. Section 5 examines the results of applying the method to a building construction project. The paper ends with a conclusion about the advantages of the proposed approach.

2 The process model and the Petri net model

2.1 The process model

This approach utilizes the component-type-based process model adopted from the CAD-integrated Simulation Modelling tool (CiSmo) (Kugler 2012). The CiSmo process model is inspired by the construction method model templates (CMMT) proposed by Aalami and Fischer (1998) and the process modelling technique addressed by Huhnt and Enge (2006).

The process model is divided into three main levels: construction activity, production process and construction method.

2.1.1 Construction activity

The process model consists mainly of a set of construction activities, each identified by a building component type, e.g., *foundation*, *column* and *beam*, and a driving resource type, e.g., *steel fitter* and *concrete pump*. While the building component type specifies the activities according to a set of CAD-object types, the driving resource type represents the resource type, the duration of which determines the duration of the activity.

The following attributes can be defined on the level of a construction activity: the production rate of the driving resource (e.g., in min/m2), the rate of the required materials (e.g., in m3/m2), and the needed construction machines (as a constant) and equipment (e.g., in unit/m3). It is important to note that the production rates of the driving resource can be defined as a deterministic or stochastic function of time.

2.1.2 Production process

As the number of activities in any given case is relatively large, it is necessary to group them into production processes according to construction trade and building component type, e.g., *concrete works of foundation*. An execution result and a set of technological prerequisites can be defined on the level of a production process.

An execution result is used to represent the state of the corresponding building component type after the process is executed. The execution result of a process can be either newly defined, or selected from a set of states belonging to the building component type attached to the process.

A technological prerequisite is a relation between two processes, namely a dependent and an independent process. The process that owns the prerequisite is the dependent process. A prerequisite is created first by relating a process either to the execution result of another construction process or to a newly defined state of a specific building component type, and then by specifying the type of the dependency relationship, i.e., *start – start*, *start – finish*, *finish – start* and *finish – finish*. The dependency relationships can be modified by time lags. When the new state of a building component type is defined, it is added to the set of states that belongs to that building component type. Thus, the newly entered value becomes a possible value while determining the execution result of the other processes. This enables the user to describe the dependency relationships among the production processes precisely.

Additionally, prerequisites and processes themselves have workflow instructions. By using the spatial terms: *this*, *previous*, *next* and *all*, the user can determine the spatial order of the process execution relative to the floors and working sections of the building.

2.1.3 Construction method

Since several production processes can handle different stages of the construction works of the same building component type, those processes can be considered together as a construction method.

In conclusion, what is interesting in the described modelling approach is that it does not require that the processes and their activities be defined in the system in their order of execution. Conversely, the user has a degree of flexibility in establishing a concept of the project execution by means of building component types in a very active way. Also through this approach, the construction knowledge of the finished projects could be used as an additional source in setting up new projects. Thus, structured data could partially replace any lack of experience and knowledge in the new projects.

2.2 The Petri net model

The standard model of a Petri net (PN) is defined by the tuple (P, T, W, M), where P: is a finite set of places, T: is a finite set of transitions, W: is a finite set of arcs and M: is a finite set of tokens representing the marking of the places.

To incorporate the domain-related semantics of the building construction field into the standard model of the PN, the transitions are annotated with the stereotype *Transition-ST*. The tags in the stereotype correspond to the attributes of the product

and process model elements, e.g., production rate and building component type. This ensures that the required data of the building product and the construction processes are not lost during the model transformation. Additional stereotypes such as *Split-ST* and *Sync-ST* will also be introduced later, which allow a preservation of the defined execution semantic of the processes.

A fundamental aspect of the building construction processes is concurrency that can easily be expressed by a conflict-free structure of a PN (also known as a marked graph) (Murata 1989). Each place in such a structure has exactly one incoming arc and one outgoing arc. Thus, the execution of a marked graph is considered deterministic, since firing any transition does not disable any other transition.

3 The mapping concept

A construction activity to be executed in a particular spatial location (i.e., specific floor and working section) of the building is represented by a transition, while the data of the activity are represented by values assigned to the attributes of the transition's stereotype. Technological prerequisites and workflow instructions in a particular spatial location are represented by a place with an incoming arc and outgoing arc that bind the appropriate transitions together.

In the proposed approach, the resource sharing among the construction activities is not modelled into the structure of the PN. In shell construction, there are basic types of construction resources that nearly every construction activity requires by its execution, e.g., a *crane* and a *steel fitter*. Further, it is a fact that some shell works on a construction site develop through successive steps depending on the technological and spatial dependency relationships among them. Considering these two facts, modelling the resource sharing of the activities into the PN as resource places is considered inefficient, since it increases the complexity of the PN by means of the number of the arcs. Additionally, it unnecessarily increases the number of the checks for enabled transitions whenever a resource is freed, though most of the extra checks will not be satisfied most of the time.

The resource requirements of an activity are modelled into the guard function of the corresponding transitions. A guard function restricts the enabling of a transition to the availability of the required resources. It is the responsibility of the simulation engine to evaluate the guard functions and to determine the enabled transitions during the runtime of a simulation run. Meanwhile, the simulation engine distributes the available resources over the enabled transitions based on a set of distribution strategies.

The timing concept is included into the model by associating a firing delay with each token as it is consumed by a transition. The firing delay specifies the time that a token has to reside in a transition, before the token is released again. This delay depends on the production rate, the quantity of the building component in the spatial location of the transition and the number of the assigned units of the driving resource.

4 Generating the Petri net

Generating the project Petri net consists of spreading the production processes and their construction activities over the floors and working sections of the building. The generation of the PN requires five steps, each of which is explained in more detail in subsections 4.1 – 4.5. After an empty PN of the project is created, a sub PN for each production process is generated and added to the project PN. Then, the generated sub PNs are associated with each other, or with the project start sub PN. Next, the net is simplified, so that dead associations and trivial transitions are eliminated from the PN. Finally, the end transitions of the processes, which are not predecessors of other transitions, are associated with the project end transition.

4.1 Step 1, create a sub PN for the project start and end

The PN created for the project consists of two dummy sub PNs representing the start of the project and the end of the project. The transitions of the sub PNs are assigned the *Start-Project-ST* and *End-Project-ST* stereotype, respectively. The initial marking of a simulation run consists of a token in the project start place, while the simulation run ends with a token residing in the project end place.

4.2 Step 2, create a sub PN for each production process

In order to spread the processes and their construction activities over the floors and working sections of the building, a set of transitions corresponding to the first activity in the process is created first. The following example describes this step in more detail. The workflow instructions of the process determine how many transitions have to be created (Fig. 1). Each transition receives the *Transition-ST* stereotype, a reference to the activity and a spatial location of execution. Next, the spatial terms of the workflow instructions that reflect the execution preference among the transitions are interpreted relative to the floors and sections of the building. Accordingly, the transitions are sorted and the sequences among them are created (step 2 and 3 in Fig. 2). Before the transitions corresponding to the rest of the activities of the process are created and connected to each other, a simplification step takes place. This step evaluates, for each transition, whether a quantity of the building component type exists in the transition's spatial location of execution. If the quantity does not exist, the transition is eliminated. Finally, the start and end transitions of the process are marked for a further purpose in the following steps.

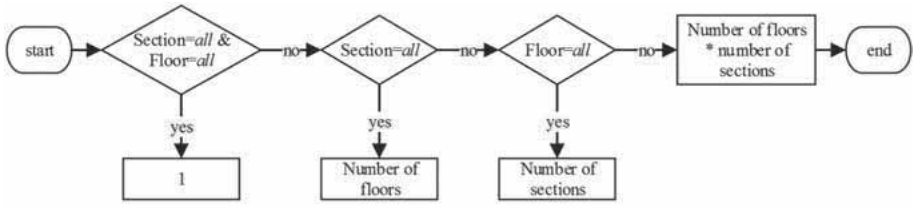


Figure 1: *A workflow diagram showing how to determine the required number of transitions according to the workflow instructions of the process itself*

Figure 2 shows an example in which a production process is spread over two floors and two working sections. The spatial terms of its workflow instructions are set to: *this* floor, *next* section. On the one hand, this means that there is no workflow preference at the level of the floors, and thus the execution can start on each floor at the same time. On the other hand, these instructions mean that the execution can start in a section of a floor after the execution in a successor section of the same floor is started. Therefore, only the transitions in each floor need to be bound together using a *start – start* dependency relationship. This is done by splitting the transition of the second section of each floor into two transitions. Each newly created transition, namely 1,2' and 2,2', receives the *Split-ST* stereotype. While the new transition gets the technological prerequisites and the resource requirements from its original transition, the original transition preserves the production rate and the quantity of the building component in its spatial location. Thus, the firing delay of the original transition's tokens could still be calculated.

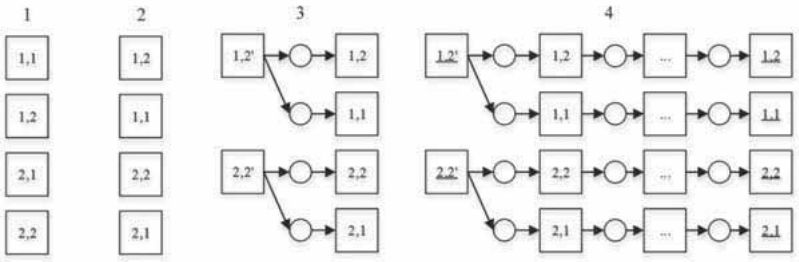


Figure 2: *Spreading a production process over two floors and two working sections. The workflow instructions of the process are set to: this floor, next working section. The label of a transition indicates the number of the floor and the number of the working section*

4.3 Step 3, associate the sub PNs with each other

This step concerns associating the generated sub PNs with each other, or with the project start sub PN according to the technological prerequisites of each production process. The transitions of the dependent process are called dependent transitions and similarly, the transitions of the independent process are called independent transitions. Consequently, this step associates each dependent transition in the dependent process with an appropriate independent transition in the independent process of a prerequisite.

When a process has no prerequisites, then its start transitions are associated with the project start transition using a *finish – start* dependency relationship. Otherwise, the algorithm enumerates the technological prerequisites and retrieves the independent process of each. The transitions of the dependent process can be either the start transitions (in the case of a *start – start* or a *finish – start* dependency relationship) or the end transitions of the process (in the case of a *start – finish* or a *finish – finish* dependency relationship). Next, for each dependent transition, the spatial location of its corresponding independent transition is determined. This depends on the spatial terms of the workflow instructions of the prerequisite in hand. After that, the algorithm distinguishes between four cases in order to retrieve the independent

transition. If the independent process is not found and the quantity of the building component in the spatial location is zero, then the PN is not affected. However, if the quantity is not zero, the result is the creation of a new transition that is assigned a *Hangover-ST* stereotype. Further, when a spatial location is not available, the project start transition (in the case of a *start – start* or a *start – finish* dependency relationship) or the project end transition (in the case of a *finish – start* or a *finish – finish* dependency relationship) is considered the independent transition.

The general case is to find and return the independent transition from the list of transitions of the independent process. While searching for the independent transition in this list, a transition with the specified spatial location might not be found. Consider the case when process B must wait until process A is executed in all the sections of the same floor, i.e., *this* floor, *all* sections. At the same time, the execution of process A in the sections of each floor is configured to be concurrent, i.e., *this* floor, *this* section. The independent transition in this case is a new transition that synchronizes the execution of process A in all the sections of each floor (Fig. 3, left side). The resulting transition receives a *Sync-ST* stereotype, a spatial location and references to the synchronized transitions. Consider also the opposite case when process B must wait until process A is executed only in the same section of the same floor, i.e., *this* floor, *this* section, while the execution of process A in the sections of each floor is configured to happen at the same time, i.e., *this* floor, *all* sections. In this case, the algorithm returns the transition that most closely matches the specified spatial location (Fig. 3, right side).

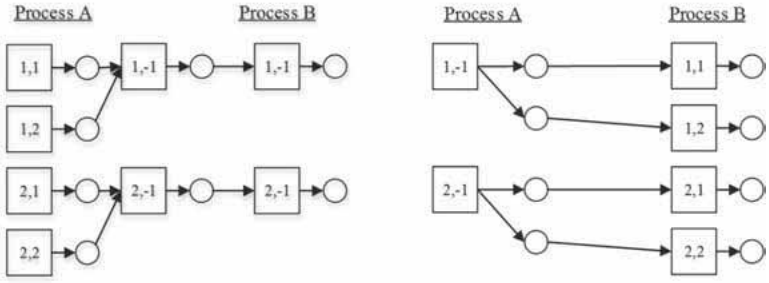


Figure 3: *A synchronization transition is created for each floor for case one (left), while, in case two (right) the most closely transitions are returned*

Finally, the dependent transition is associated with the retrieved independent transition according to the type of the dependency relations of the current prerequisite (Fig. 4). For example, a *start – finish* dependency relationship between transition A and transition B requires splitting each into two transitions, namely A' and B'. While transition A' receives a *Split-ST* stereotype, transition B' receives the *Fwd-Split-ST* stereotype, and is assigned only a reference to its original transition B. In addition, a place with one incoming arc and one outgoing arc is created. The place's incoming arc is added to the set of the post-arcs of transition A', and the place's outgoing arc is added to the set of the pre-arcs of newly created transition B'.

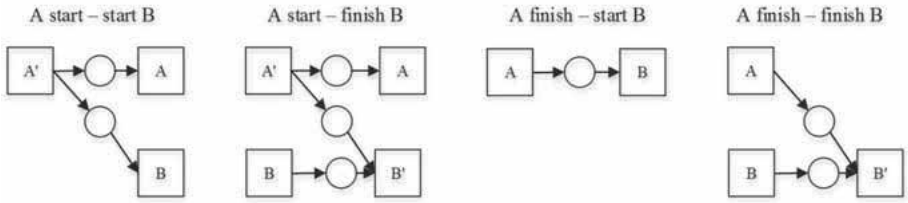


Figure 4: *Four Petri net models representing the standard dependency relationships*

The dependency relationships can be modified by time lags. This requires the creation of a transition that is assigned an *Interval-ST* stereotype and a firing delay corresponding to the interval given in the process data (Fig. 5).

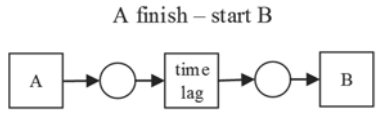


Figure 5: *Example of how to model a time lag of a dependency relationship, here a finish – start relationship*

4.4 Step 4, simplify the structure of the PN

The fourth step is to simplify the structure of the PN so that dead associations and trivial transitions are eliminated from the PN. By definition, a dead association is a place associating a source transition with a target transition reachable through a chain of places starting from the same source transition. In this case, the place and its incoming and outgoing arcs can be spared.

A trivial transition is a transition that either is assigned a *Split-ST* or a *Sync-ST* stereotype (but not a *Transition-ST*), and has only one outgoing arc; or is assigned a *Fwd-Split-ST* stereotype and has only one incoming arc. In the case of a transition with a *Split-ST* or a *Sync-ST* stereotype, the set of pre-arcs are moved and added to the set of pre-arcs of the following transition. Then, the transition itself and its following place are eliminated. In the case of a transition with a *Fwd-Split-ST* stereotype, the set of post-arcs are moved and added to the set of post-arcs of the previous transition. Then, the transition itself and its previous place are eliminated.

4.5 Step 5, associate sinks with the project end transition

In the last step, the end transitions of the processes are checked. Each end transition that does not have post-arcs to places connecting it to other transitions, i.e., a sink transition, is associated with the project end transition using a *finish – start* dependency relationship.

5 Discussing the results

The implementation of the proposed method is a part of the simulation environment MOSAICA (Samkari et al. 2012b). MOSAICA is loosely coupled from CiSmo system, which is integrated into the CAD-environment AutoCAD Architecture. The

CiSmo plugin automatically collects the product data of the building model of a construction project and saves them to a XML file. The process data are put into the system using CiSmo's GUIs and are saved to a MySQL database. MOSAICA allows read access to the product and process data of CiSmo using a specific programming module that is compatible with the data structure of CiSmo. Similarly, it is possible to develop modules that allow read/write access to a variety of data formats of product and process data of other building modelling environments and/or planning and management information systems. In addition, MOSAICA allows the visualization of a Petri net created for a project using an open source graph visualization software called *Graphviz*. The Petri net diagram allows a visual check for inconsistencies in the structure of the net. In addition, a verification and validation (V&V) method was developed and integrated into MOSAICA (Samkari and Franz 2012a). The V&V method checks, for example, whether a firing sequence exists from the project start transition to the project end transition and whether the execution of the net is deadlock-free. In addition, it checks whether all building component types are assigned a construction activity and will be constructed. Consequently, this results in an increased accuracy of the simulation results.

The implemented method is applied to a four-story nursing home. Each floor of the building is divided into four working sections. The building 3D-CAD-model contains building components of 24 different building component types. The component types are associated with 60 construction activities representing the shell works of the project. The source of the process data is the real execution plan of the project. The generated Petri net contains 599 transitions: 462 *Transition-ST* transitions, 118 *Split-ST* transitions, 14 *Interval-ST* transitions, 3 *Sync-ST* transitions, 1 *Start-Project-ST* transition and 1 *End-Project-ST* transition.

The application of the *liveness* property to the Petri net detected dependency relationships to undefined production processes as well as flow deadlocks resulting from errors in the specification of the workflow instructions of a dependency relationship of a process. Also, the application of the *reachability* property to the Petri net detected building component types that are not assigned to production processes.

This test case revealed some issues that make the application of the proposed modelling approach less practical than it could be. For example, the generated Petri net is visually difficult to read and understand since it contains a large number of nodes and arcs. Thus, a tool to specify which parts of the net to visualize is extremely conceivable. Also, the generated net is strongly dependent on MOSAICA framework which makes the net not directly executable in other Petri net simulators. An attempt to transform the generated net into the format of other Petri net simulators would support the portability of the proposed modelling approach.

In order to validate the approach, the results of the execution of the Petri net using MOSAICA are compared to the results of the execution of the same product and process data under the same experiment conditions in another simulation environment (Kugler 2012). The comparison shows the results to be identical in terms of the plan of the construction activities and their execution durations on the floors and in the working sections of the building.

6 Conclusion

This paper presents a reliable method to generate a marked graph Petri net from the product and process data of a construction project. By first generating a sub Petri net for each production process and then by associating the sub nets according to the technological and spatial dependency relationships, a project network describing the execution plan on the floors and in the working sections of the building is created. The focus of this paper is on an approach combining the component-type-based process model of CiSmo with a discrete time stochastic Petri net model. The approach ensures a high flexibility in modelling construction processes and provides a formal method in analysing the static and dynamic behaviour of the processes. Moreover, it relieves a non-expert user of the task of dealing with the principles of the Petri net theory. The application of the introduced method to a four-story nursing home confirmed the validity of the approach.

References

Aalami, F.; Fischer, M.: Joint product and process model elaboration based on construction method models. In: Björk, B.C.; Jädbeck, A. (Ed.): Proceedings of CIB W078 conference, The life-cycle of construction IT innovations – Technology transfer from research to practice, Stockholm (Sweden), 05.-08. June 1998.

Franz, V.: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen. Kassel, Gesamthochschule Kassel 1989.

Huhnt, W.; Enge, F.: Can algorithms support the specification of construction schedules?. Journal of Information Technology in Construction 11 (2006) Special Issue Process Modelling, Process Management and Collaboration, pp. 547-564.

Kugler, M.: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Kassel, kassel university press 2012.

Murata, T.: Petri nets: Properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE 77 (1989) 4, pp. 541-580.

Samkari, K.; Franz, V. (2012a) A Petri net based method for the early verification & validation of a simulation study in construction management. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A.M. (Ed.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin (Germany), 09.-12. December 2012, pp. 344:1-344:2.

Samkari, K.; Kugler, M.; Kordi, B.; Franz, V. (2012b) Colored Petri-net and Multi-Agents: A Combination for a Time-efficient Evaluation of a Simulation Study in Construction Management. In: Issa, R.R.; Flood, I. (Ed.): Proceedings of the 2012 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, Florida (USA), 17.-20. June 2012, S. 153-160.

Sawhney, A.: Petri Net Based Simulation of Construction Schedules. In: Andradóttir, S.; Healy, K.J.; Withers, D.H.; Nelson, B.L. (Ed.): Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (WSC), Atlanta (USA), 07.-10. December 1997, pp. 1111-1118.

Van der Aalst, W.M.P.: Petri net based scheduling. Operations-Research-Spectrum 18 (1996) 4, pp. 219-229.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulationsgestützter Kraneinsatzplaner für Hochbauprojekte

Simulation-based crane operations planner for building construction projects

Habeb Astour, Volkhard Franz, Universität Kassel, Kassel (Germany),
h.astour@uni-kassel.de, vfranz@uni-kassel.de

Abstract: As part of the research work of the department of construction management at Kassel University, in the area of simulation of construction processes, a reference model for the simulation of building construction processes was implemented. For which an adequate consideration of the spatial and temporal boundary considerations takes place. The reason for this was the development of a process modeling method that allows a simple parameterization of the simulation model based on CAD data. Building site facilities, which have an appropriate functionality target for construction and include all production, transportation, storage and other items that are needed for a building project has not yet been considered in detail in the previous implementation. This article presents an extended reference model with which the logistic processes of the crane operation can be practicable mapped in practice.

1 Einleitung

Die Planung einer Baustelleneinrichtung als ein Bindeglied zwischen der Planung und der Realisierung von Hochbauprojekten hat zur Aufgabe, für einen möglichst optimalen Materialfluss und für einen effektiven Einsatz von kostenintensiven Maschinen zu sorgen (Bauer 2007).

Dabei stellen bei Hochbauprojekten Turmdrehkrane das Hauptfördermittel baustelleninterner Materialtransporte dar, wobei sie nicht nur Materialien vom LKW zum Lagerplatz und zur Einbaustelle transportieren, sondern auch für die Montage von z. B. Schalung und Fertigteilelementen eingesetzt werden. Für den wirtschaftlichen Erfolg einer Baumaßnahme ist es daher für das Bauunternehmen u. a. von großer Bedeutung, den Kraneinsatz auf der Baustelle so detailliert wie möglich zu planen. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein simulationsgestützter Kraneinsatzplaner vorgestellt, der alle maßgebenden Faktoren während der Ausführungsphase berücksichtigt.

2 Simulationsgestützter Kraneinsatzplaner

Die dieser Forschungsarbeit zu Grunde liegende Literaturrecherche hat ergeben, dass bisher noch kein durchgängiges und praxistaugliches System zur Planung und Optimierung des Kraneinsatzes existiert. Die bisherigen Forschungsarbeiten zur rechnergestützten Optimierung des Kraneinsatzes befassen sich vornehmlich mit der Lösung von Teilaspekten (Kath 2005, Bindick 2006, Günthner et al. 2010, Irzarry und Karan 2012 etc.). In ihnen wurden weder die Bauzeit, die Warte- und Betriebszeiten, die Kranbewegungsregeln (wie z. B. Vorfahrtsregeln beim Mehrkranbetrieb) noch andere Sicherheitsmaßnahmen einbezogen, welche beim Kranbetrieb in Form einer Kranbetriebsanweisung gegeben sind. Eine Berücksichtigung der Positionierung und Dimensionierung von Turmdrehkranen, unter Beachtung aller auf der Baustelle einfließenden Faktoren und deren Wechselwirkungen während der Ausführungsphase, wird ebenfalls nicht von ihnen behandelt.

Max und König (2010) haben ein Konzept zur Modellierung und Analyse typischer räumlicher Interaktionen von Baukranen beim Mehrkranbetrieb während des Transports und Einbaus von Betonfertigteilen vorgestellt. In diesem Beitrag wird jedoch die Möglichkeit des Überschwenkens mit und ohne Last der oberen sich bewegenden Krane über die niedrigeren nicht betrachtet. Darüber hinaus finden auch die Vorfahrtsregeln der sich gleichzeitig bewegenden Krane keine hinreichende Berücksichtigung.

Um einen praxistauglichen Kraneinsatzplaner zu implementieren, muss zunächst das Simulationsmodell in der Lage sein, das richtige Verhalten der Turmdrehkrane bzw. deren Führer unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Sicherheitsvorschriften zu erfassen. Hierfür wurde im Zuge der Forschungsarbeit ein Kranverhaltensmodell innerhalb des Simulationsmodells entwickelt und implementiert, das das Verhalten von Kranführer und Antikollisionsmaßnahmen simuliert. Darüber hinaus ist dieses Modell bei einem Mehrkranbetrieb im Stande, den Informationsfluss zwischen den Kranen in Echtzeit während des Simulationslaufs realitätsnah abzubilden.

3 Das Kranverhaltensmodell

Die Abbildung 1 zeigt das UML-Aktivitätsdiagramm der Turmdrehkrane in dem entwickelten Simulationsmodell. Dieses Diagramm repräsentiert das Kranverhaltensmodell und lehnt sich an das von Kugler (2012) entwickelte Simulationsmodell an.

Die Krane warten zuerst auf die von ihnen zu erfüllenden Aufträge. Sie erhalten diese Aufträge als Anfragen von den entsprechenden Arbeitsgruppen. Hat mindestens ein Kran einen Auftrag, werden innerhalb der Aktivität (Untermodell) *Krane ohne Auftrag* die Sicherheitsmaßnahmen ergriffen, die dazu dienen, die Kollision zwischen den zu bewegenden und nicht zu bewegenden Kranen zu vermeiden. Innerhalb der Aktivität (Untermodell) *Quelle ansteuern* bewegen sich die beauftragten Krane zur Materialquelle. Dort werden zudem die Sicherheitsmaßnahmen ergriffen, die zur Vermeidung von Kollisionen der sich bewegenden Krane miteinander notwendig sind. Hat ein Kran die Materialquelle erreicht, kann er die Materialien aufnehmen. Nach der Materialaufnahme bewegt sich gegebenenfalls ein Kran zur Materialsenke, d.h. zu den Bauabschnitten bzw. zu

den entsprechenden Bauteilen, wo die Materialien entladen werden. Dieser Prozess wird wiederholt bis der Kran seinen Auftrag erledigt hat. Danach wartet der Kran bzw. warten die Krane erneut auf neue Aufträge.

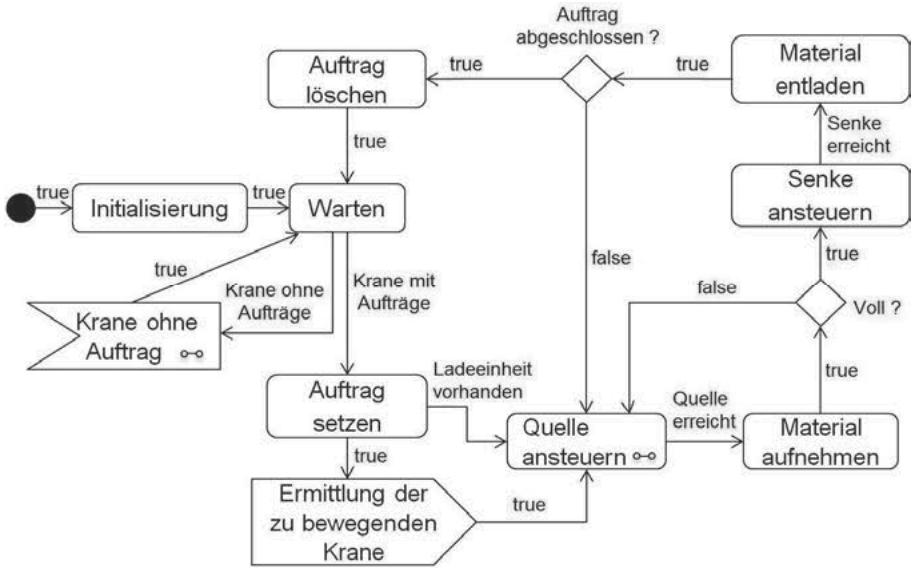


Abbildung 1: *UML Aktivitätsdiagramm der Turmdrehkrane*

Im Folgenden werden die beiden Untermodelle *Kran ohne Auftrag* und *Quelle ansteuern* beschrieben.

3.1 Untermodell *Kran ohne Auftrag* des Kranverhaltensmodells

Die Kollisionsgefahr kann erst bestehen, wenn mindestens ein Kran sich bewegen muss. In diesem Fall müssen sich auch die Krane ohne Aufträge bewegen, die sich in dem Arbeitsbereich des sich bewegenden Krans befinden. Mit dem Arbeitsbereich ist der Bereich gemeint, in dem sich der Kran während der Durchführung seines Auftrags bewegt. Die Zustandsdaten aller Krane ohne Aufträge werden nun erfasst und mit den Zustandsdaten der sich bewegenden Krane verglichen. Die Zustandsdaten umfassen die Positionen der Systemelemente (Kran, Kranbauteile, Gebäude und Hindernisse auf der Baustelle) und die Bewegungsregeln der Krane. Diese Daten werden aus der CAD-/BIM-Umgebung, aus der SQL-Datenbank und aus der Simulationsumgebung während der Simulationsläufe ausgelesen.

Der Vergleich erfolgt entsprechend dem Untermodell *Kran ohne Auftrag* des Kranverhaltensmodells (Abb. 2).

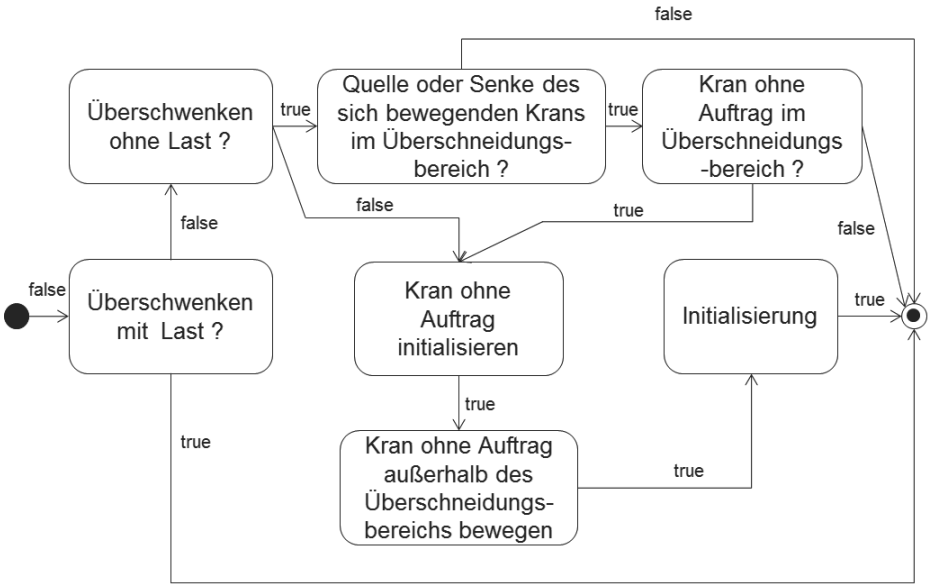


Abbildung 2: *Untermodell Kran ohne Auftrag des Kranverhaltensmodells*

Der Kran ohne Auftrag wird sich nicht bewegen, wenn obere sich bewegende Krane ihn mit Last überschwenken dürfen und er untere sich bewegende Krane überschwenken (ohne oder mit Last) darf. Der Kran ohne Auftrag wird sich auch nicht bewegen, falls der Arbeitsbereich des sich bewegenden Krans nicht in seinem Überschneidungsbereich mit dem Kran ohne Auftrag ist oder falls der Ausleger des Krans ohne Auftrag außerhalb von seinem Überschneidungsbereich mit dem sich bewegenden Kran ist. Der Überschneidungsbereich ist der Bereich auf der Baustelle, in dem mehr als ein Kran arbeiten kann. Der Überschneidungsbereich entsteht, wenn der Abstand zwischen zwei Kranen weniger als die Summe der Auslegerlängen dieser Krane beträgt.

Außer den beiden obengenannten Fällen muss sich der Kran ohne Auftrag außerhalb der entsprechenden Überschneidungsbereiche bewegen.

Der Kran hat bei seiner Bewegung bzw. Drehung zwei Alternativen:

- Drehen im Uhrzeigersinn (der negative Drehsinn) oder
- Drehen gegen den Uhrzeigersinn (der positive Drehsinn)

Bei der Auswahl der Drehrichtung wird der Drehsinn genommen, mit dem der Kran schneller den sicheren Bereich außerhalb der gefährlichen Überschneidungsbereiche erreichen kann.

In Abbildung 3 wird die positive Drehrichtung ausgewählt, da in dieser Richtung der sichere Bereich schneller erreicht werden kann.

Beim Erreichen des sicheren Bereichs wird der Kran ohne Auftrag zurückgesetzt, um wieder den Ausgangszustand als Kran ohne Auftrag, aber in einer neuen Position zu erhalten.

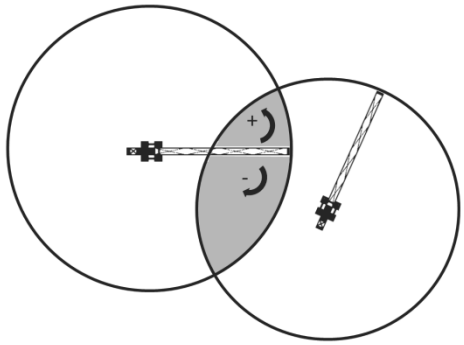


Abbildung 3: *Auswahl der Krandrehrichtung*

3.2 Untermodell *Quelle ansteuern* des Kranverhaltensmodells

Nach der geeigneten Bewegung aller Krane ohne Aufträge anhand der oben beschriebenen Vorgehensweise können sich nun die zu bewegenden Krane bewegen. Falls die Anzahl der sich bewegenden Krane 1 ist, besteht in dem System nunmehr keine Kollisionsgefahr und dieser Kran kann sich störungsfrei bewegen (Abb. 4).

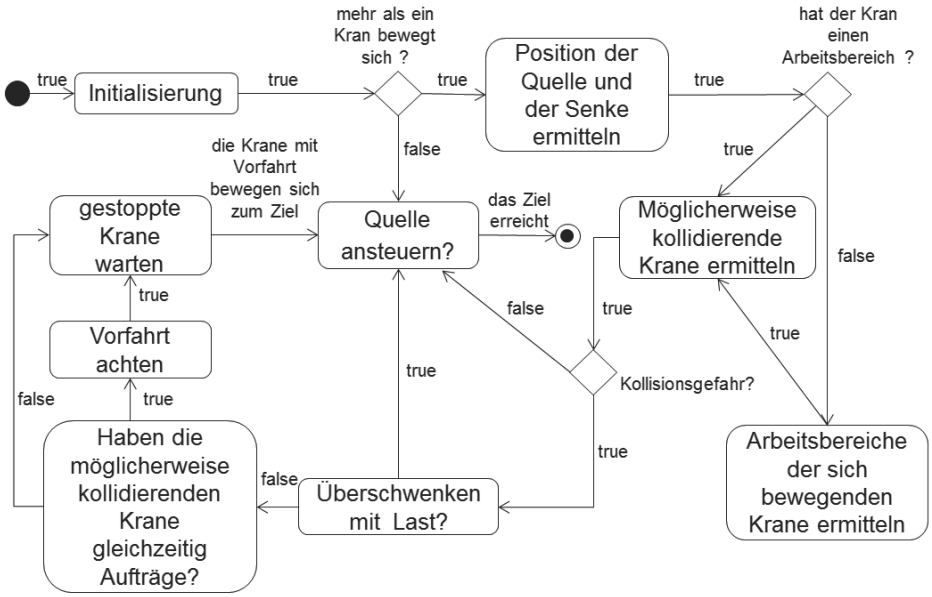


Abbildung 4: *Untermodell Quelle ansteuern des Betriebsmittelagenten*

Ist aber die Anzahl der sich bewegenden Krane mehr als 1, werden die Zustandsdaten dieser Krane paarweise miteinander verglichen. Haben aber die sich bewegenden Krane keine gemeinsamen Überschneidungsbereiche, können sich die Krane kollisionsfrei bewegen. Die Kollisionsgefahr zwischen den sich bewegenden Kranen kann entstehen, wenn sie einen gemeinsamen Überschneidungsbereich

haben und beide Krane diesen bei ihren Bewegungen überschwenken. Wenn hingegen nur einer von den sich bewegenden Krane den Überschneidungsbereich überschwenkt, sind die Bewegungen der Krane auch kollisionsfrei.

Die Kollisionsgefahr zwischen zwei sich bewegenden Kranen (z. B. Kran 1 und Kran 2) (Abb. 5), die einen gemeinsamen Überschneidungsbereich haben, besteht nur, wenn mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Die Materialquellen von Kran 1 und Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.
- Die Materialquelle von Kran 1 und die Senke von Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.
- Die Senke von Kran 1 und die Materialquelle von Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.
- Die Senken von Kran 1 und Kran 2 sind in deren Überschneidungsbereich.

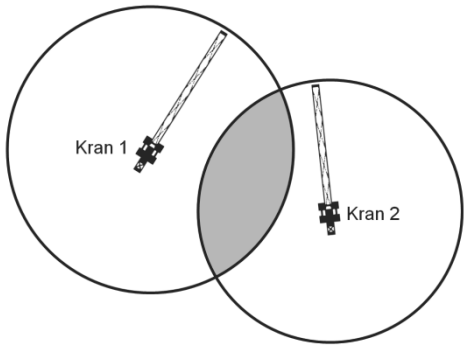


Abbildung 5: *Zwei sich bewegende Krane mit einem Überschneidungsbereich*

Ist mindestens eine der obengenannten Bedingungen erfüllt, werden die Arbeitsbereiche der betroffenen Krane ermittelt. Der Arbeitsbereich wird mithilfe der Punkte (Punkt 1, Punkt 2) ermittelt, zwischen denen der Kran die Materialien transportiert (Abb. 6).

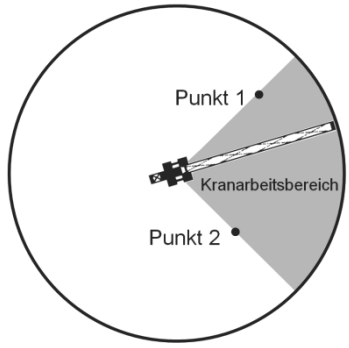


Abbildung 6: *Die Ermittlung des Arbeitsbereichs eines Krans*

Die Erfüllung einer oder mehrerer von den obengenannten Bedingungen bedeutet aber nicht unbedingt eine Krankollision. Das bedeutet nur, dass die Arbeitsbereiche der Systemkrane (oder Teile davon) den Überschneidungsbereich überlappen. Die Abbildung 7 zeigt zwei Krane deren Arbeitsbereiche teilweise in dem Überschneidungsbereich liegen, deren Arbeitsbereiche sich aber nicht überlappen. In diesem Fall können sich die beiden Krane kollisionsfrei bewegen.

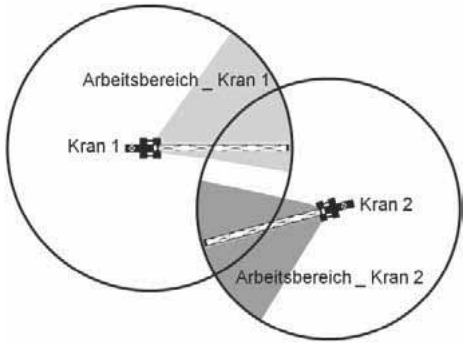


Abbildung 7: *Nicht überlappende Arbeitsbereiche*

Die Abbildung 8 zeigt den Fall, bei dem zwei Arbeitsbereiche sich überlappen. Die schraffierte Fläche repräsentiert den Bereich, in dem die Krane möglicherweise kollidieren werden.

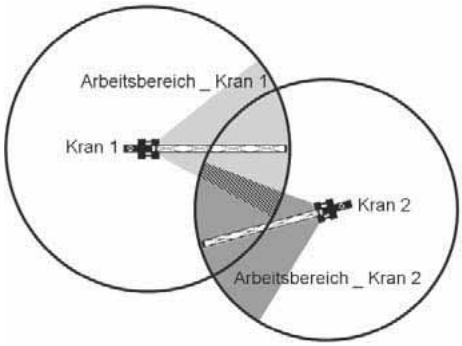


Abbildung 8: *Überlappende Arbeitsbereiche*

Bei den überlappenden Arbeitsbereichen der sich gleichzeitig bewegenden Krane erreicht das System den kritischen Punkt. Daher wird eine Reihe von Sicherheitsüberprüfungen durchgeführt, bevor diese Krane sich bewegen dürfen.

Zuerst werden die möglicherweise kollidierenden Krane in Form einer zweispaltigen Tabelle aufgelistet (Tab. 1).

Tabelle 1: *Auflistung von möglicherweise kollidierenden Kranen am Beispiel von drei Kranen*

Spalte 1	Spalte 2
Kran 1	Kran 2
Kran 1	Kran 3
Kran 2	Kran 3

Jede Zeile in dieser Tabelle repräsentiert ein Paar von Kranen, die möglicherweise miteinander kollidieren könnten.

Anschließend werden diese Krane zeilenweise nach den Bewegungssicherheitsregeln überprüft, die in der externen SQL-Datenbank gespeichert sind, damit Kollisionen vermieden werden können. Falls einer der beiden Krane in einer Zeile den anderen Kran in der gleichen Zeile mit Last überschwenken darf, wird dieses Paar als kollisionsfreies Paar bezeichnet. Dieser Vorgang wird für jede Zeile der obigen Tabelle wiederholt. Als Ergebnis werden sich die Krane bewegen, die sich kollisionsfrei bewegen können. Die anderen Krane müssen noch paarweise überprüft werden. Für jedes Paar werden die beiden Krane gefragt, ob sie gleichzeitig deren Aufträge bekommen haben. Falls nicht, wird sich der Kran bewegen, der zuerst den Auftrag bekommen hat. Der andere Kran in dem entsprechenden Paar muss vorübergehend gestoppt werden. Haben aber die beiden Krane deren Aufträge gleichzeitig erhalten, wird sich der Kran bewegen, der die Vorfahrt hat. Der andere Kran in diesem Paar wird temporär gestoppt. Die gestoppten Krane müssen bis zu dem Zeitpunkt warten, in dem das System seinen Zustand ändert und sie wieder die Möglichkeit haben, sich unter Berücksichtigung der Bewegungsregeln zu bewegen und ihre Transportaufträge zu erledigen.

Die Entscheidung, welche Krane sich bewegen dürfen und welche gestoppt werden müssen, hängt sehr stark davon ab, welcher Kran bzw. welche Krane die Transportaufträge haben, welche die Priorität nach der Reihenfolge der Bauprozesse besitzen. Deshalb werden manchmal die Krane gestoppt, die Aufträge mit weniger Priorität haben.

4 Grafische Überwachung

Mit Hilfe des in der Simulationsumgebung eingebetteten Visualisierungswerkzeuges wird eine Animation der Draufsicht von der Baustelle mit allen vorhandenen Elementen generiert, die es dem Anwender ermöglicht, den Bewegungsablauf der Krane zu verfolgen (Abb. 9). Dadurch wird ein schneller und einfacher Überblick über die gesamte Funktionsweise der Krane und deren mögliches Kollisionsverhalten gegeben. Anschließend wird der Auslastungsgrad der verwendeten Krane errechnet.

Durch die Änderung der Dimensionen und/oder Positionen der verwendeten Krane bzw. durch die Änderung der Kranbewegungsregeln ändern sich der Auslastungsgrad der Krane sowie möglicherweise die Gesamtbauzeit. Anhand mehrerer Simulationsläufe können letztlich die passenden Krandimensionen, -positionen und -bewegungsregeln unter Berücksichtigung der entsprechenden

Auslastung der Arbeitsgruppen, die von den verwendeten Kranen bedient werden, festgelegt werden.

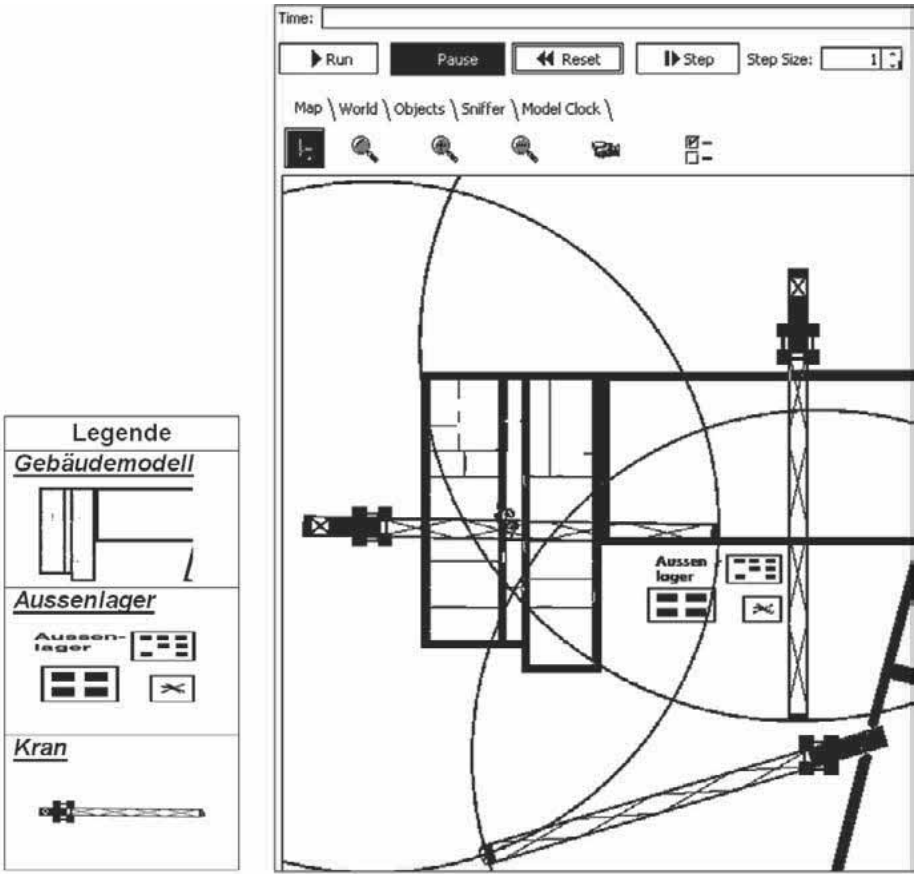


Abbildung 9: *Das Visualisierungswerkzeug der Simulationsumgebung*

5 Fazit und Ausblick

Mit dem vorgestellten simulationsgestützten Kraneinsatzplaner ist es möglich, das Kranverhalten in Abhängigkeit der sich verändernden Baustellenparameter über die ganze Ausführungszeit zu betrachten und, sofern erforderlich, Änderungen an der Dimensionierung und/oder Positionierung des Krans bzw. der Krane vorzunehmen. Da die Gebäudedaten aus den CAD-/BIM-Dokumenten automatisch entnommen werden und für die Kraneinsatzplanung der Anwender nur noch wenige Angaben mit Hilfe von Eingabemasken vornehmen muss, können ohne großen Mehraufwand mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt werden.

Die zukünftige Arbeit wird sich zum einen auf die Positionierung und Dimensionierung der anderen Baustellenelemente wie z. B. Lagerflächen, Werkplätze und Bearbeitungsflächen sowie Sozial- und Büroeinrichtungen und zum anderen auf die Validierung des Kraneinsatzplaners konzentrieren.

Literatur

Bauer, H.: Baubetrieb. Berlin, Heidelberg: Springer 2007.

Bindick, S.: Ein Prototyp zur rechnergestützten Kraneinsatzplanung mit dem Autodesk Architectural Desktop 2005. Studienarbeit Technische Universität Braunschweig, Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen, 2006.

Günthner, W. A.; Kessler, S.; Horenburg, T.; Frenz, T.: 4D-Einsatzplanung von Turmdrehkranen. BauPortal 7 (2010), S. 393-395.

Irzarry, J.; Karan, I.: Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration. Journal of Information Technology in Construction 17 (2012), S. 351-366.

Kath, T.: Sicher arbeiten mit Kränen durch Simulation und Visualisierung. In: Bargstädt, H. (Hrsg.): Sicherheit auf Baustellen. Bauhaus-Universität Weimar 2005, S. 29-34.

Kugler, M.: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Kassel: kassel university press 2012.

Marx, A.; König, M.: Simulation von Bauprozessen unter Berücksichtigung zeitvarianter räumlicher Restriktionen. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationspakete der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 133-140.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Ansatz zur simultanen Durchführung statistischer Versuchspläne mittels farbiger Petri-Netze zur Simulation von Bauprozessen im Hochbau

Approach for the simultaneous execution of statistical experiments using coloured Petri nets in building construction simulation

Kais Samkari, Volkhard Franz, Universität Kassel, Kassel (Germany),
ksamkari@uni-kassel.de, vfranz@uni-kassel.de

Abstract: Analysing building construction processes using simulation requires the investigation of a large number of systematic simulation runs in order to understand the dynamic behaviour of the system. This thorough analysis using simulation, however, is computationally expensive, and thus a computationally efficient model is required. In this paper, a Petri net-based approach to simultaneous, discrete event simulation is proposed. This approach associates each of the simulation runs of an experiment with a colour, so that it allows the simultaneous execution of the simulation runs using one mutual coloured Petri net on the same computer. After describing the simulation concept of this approach, the paper depicts a computational analysis and indicates that a computational saving can be achieved by generating one mutual coloured Petri net for the simulation runs of the experiment.

1 Einleitung

Die effiziente Ausführung eines Bauprojekts im Hochbau setzt in der Arbeitsvorbereitung die Erstellung eines wirtschaftlich optimierten Terminplans voraus. Eine der Herausforderungen der Bauterminplanung ist der Unikatcharakter eines Gebäudes, der eine projektspezifische Betrachtung in der Planungs- und Ausführungsphase erfordert. Bauprozesse, die in der Regel eine Vielzahl von Bautätigkeiten aufweisen, können somit nicht im Voraus geplant werden. Außerdem existieren zwischen den einzelnen Tätigkeiten sogenannte Abhängigkeitsbeziehungen, d. h., bestimmte Arbeiten müssen erledigt sein, bevor andere Tätigkeiten beginnen können. Diese Voraussetzungen geben die technischen Abhängigkeiten und organisatorischen Anordnungen zwischen den Bautätigkeiten auf der Prozessebene an. Darüber hinaus verfügen die zur Ausführung der Bauaktivitäten erforderlichen Arbeitskräfte und Betriebsmittel nur über begrenzte Kapazitäten, die auf der Baustelle dynamisch variieren. Ohne die entsprechende Verfügbarkeit der Betriebsressourcen werden die Baumaßnahmen sequenziell

ausgeführt, obwohl sie bei ausreichender Anzahl gleichzeitig ausgeführt werden könnten.

Weiterhin zeigt die Baupraxis zum einen, dass Änderungen und neue Anforderungen an das Bauwerk den Baubetrieb stets begleiten und zu beachtlichen Abweichungen vom geplanten Bauablauf führen können. Zum anderen wird der Terminplanung sowohl in der Arbeitsvorbereitungs- als auch in der Ausführungsphase nicht genügend Zeit gegeben. Infolgedessen stehen die verantwortlichen Ingenieure bei der Entscheidung über den Produktionsverlauf der Baumaßnahme unter hohem Zeitdruck. Die Erstellung eines wirtschaftlich optimierten Terminplans, in dem die zur Verfügung stehenden, knappen Ressourcen auf effektive Weise genutzt werden, ist somit nicht unproblematisch. In diesem Zusammenhang ist der Einsatz der Simulation zur Analyse des Verhaltens von dynamischen Unikatprozessen in der Arbeitsvorbereitung ein wesentlicher Aspekt.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Die Simulation gehört zum Bereich „Operations Research“ und gilt als ein Analysewerkzeug, um die dynamischen Prozesse eines Systems besser nachvollziehen zu können. Bei der linearen Optimierung des Operations Research handelt es sich um die Suche nach einer optimalen Lösung, in der die Werte bestimmter Modellparameter so gestaltet werden, dass die linearen Zielgrößen eines Systems unter bestimmten, linearen Bedingungen maximiert oder minimiert werden. Bei der Simulation hingegen werden Hypothesen durch verschiedene, stochastische Simulationsexperimente unter bestimmten, nichtlinearen Bedingungen erzielt. Aufgrund der vielfältigen Hypothesen können bei der Simulation realitätsnahe Aussagen über das Verhalten des als System betrachteten Bauprojekts gewonnen werden, die der Entscheidungsfindung eines Bauunternehmens bezüglich der Terminplanung dienen sollen.

In den meisten Ansätzen zur Simulation im Bauwesen wird vorrangig die Modellierung von Bauprozessen betrachtet (Schopbach 2001, Chahrour 2006, Rueppel et al. 2004, König und Beißert 2008, AbouRizk und Hague 2009, Enge und Huhnt 2010, Scherer und Ismail 2011, Kugler 2012). Ziel dieser Ansätze ist die Reduzierung des Aufwands bei der Erstellung des Simulationsmodells und der Festlegung der erforderlichen Parameter. Beispielhaft zu nennen sind der Ansatz zur Wiederverwendung einmal angelegter Prozessvorlagen, das constraint-basierte Modellierungskonzept und der Ansatz zur Integration einer Modellierungsumgebung in einem CAD-System.

Bei der Simulation komplexer Systeme ist eine effiziente Versuchsplanung erforderlich. Hierbei ist eine einfache Vorgehensweise, in der sich der Simulationsanwender bei der Variation der Parameter von seiner Intuition leiten lässt, in der Regel ungeeignet (VDI 3633 - Blatt 3 1997, S. 5). Sanchez und Wan (2012) weisen darauf hin, dass viele komplexe Simulationsmodelle mit einer unsystematischen Vorgehensweise erforscht werden. Trotzdem ist festzuhalten, dass die in der vorhandenen Literatur betrachteten Simulationsmodelle parametrisierbar sind und die Untersuchung verschiedener Kombinationen der einzelnen Modellparameter ermöglichen.

3 Problembeschreibung und Aufbau des Beitrags

Im Gegensatz zur Modellierung von Simulationsmodellen steht das Thema der statistischen Versuchsplanung und Auswertung bei der Simulation von Bauprozessen im Hochbau noch nicht im Fokus der Forschung. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit diesem Thema und stellt eine systematische Vorgehensweise vor, mit der das mehrfache Erstellen eines Simulationsmodells für verschiedene Simulationsläufe eines Versuchsplans eingespart werden kann.

Das eingesetzte Personal zur Untersuchung eines Versuchsplans verursacht nicht unerhebliche Kosten. Der Versuchsaufwand wird mathematisch in der Form m^k ausgedrückt und bedeutet, dass k Faktoren des Modells auf m Stufen untersucht werden sollen. Zum Beispiel ergeben sich bei vier Faktoren auf vier Stufen 256 Simulationsläufe, die unterschiedliche Ergebnisse liefern könnten. Im Prinzip sollen alle Simulationsläufe untersucht werden, um das Verhalten des Systems unter bestimmten Bedingungen besser einschätzen zu können. Jedoch wird der Aufgabe der Analyse mittels Simulation weder in der Arbeitsvorbereitungs- noch in der Ausführungsphase genügend Zeit gegeben, wodurch viele Simulationsläufe vernachlässigt werden.

Um die Rechenzeit zur Durchführung eines Versuchsplans, d. h. die Erstellung sowie die Ausführung eines Versuchsplans, zu reduzieren, können verschiedene Simulationsläufe simultan durchgeführt werden. In der Literatur wurden Ansätze zur Umsetzung einer simultanen Vorgehensweise bei der Simulation beispielhaft auf Basis der Zeitdilatation (Schruben 1997) und eines Entscheidungsbaums (Mejtsky 2007) vorgestellt. In diesem Beitrag werden verschiedene Simulationsläufe eines diskreten, ereignisorientierten Simulationsmodells simultan mittels eines farbigen Petri-Netzes durchgeführt. Jeder Simulationslauf des Versuchsplans wird dabei als Petri-Netz abgebildet. Kapitel 4 beschreibt zunächst den Aufbau eines Petri-Netzes. In Kapitel 5 wird eine Analyse der Rechenzeit zur Durchführung des Versuchsplans sowohl theoretisch als auch praktisch anhand eines Bauprojekts durchgeführt. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

4 Simultanes, Petri-Netz-basiertes Simulationskonzept

Der Forschungsansatz in diesem Beitrag verwendet ein Petri-Netz-basiertes Simulationsmodell (Samkari et al. 2012b). Petri-Netze eignen sich besonders für die Modellierung und Analyse der fundamentalen Phänomene der Nebenläufigkeit von Bauprojekten (Franz 1989). Das Petri-Netz kann automatisch aus den Produkt- und Prozessdaten erstellt werden, die anhand des Plug-ins „CiSmo (CAD-integrierte Simulationsmodellierung)“ erfasst werden (Kugler 2012). CiSmo erfasst die Produktdaten aus der CAD-Zeichnung des Gebäudes, wobei die Prozessdaten über das CiSmo-Menü-System eingegeben werden. Das automatisch erstellte Petri-Netz hat eine konfliktfreie Struktur, d. h., jede Stelle hat eine einzelne Eingangs- und Ausgangskante. Vor der Simulation findet eine Verifizierungs- und Validierungsanalyse statt (Samkari und Franz 2012a). Bei dieser Analyse werden Syntax- und Bedeutungsfehler der Netzstruktur erkannt und beseitigt. Dies wirkt sich durch eine höhere Genauigkeit der Simulationsergebnisse aus.

4.1 Zuordnung eines Bauvorgangs zum Petri-Netz

Ein Bauvorgang im CiSmo-Prozessmodell ist einem konkreten Bauteiltyp, einem Ergebnis und einem zeitlichen Aufwandswert, basierend auf den maßgebenden Betriebsressourcen, zugeordnet. Jeder Bauvorgang kann mit den Ergebnissen anderer Bauvorgänge durch das Festlegen von Abhängigkeitsbeziehungen verknüpft werden. Damit können die Abhängigkeitsbeziehungen und die Fertigungsrichtung zwischen den Vorgängen exakt beschrieben werden. Tabelle 1 zeigt beispielhaft drei Bauvorgänge aus den vorhandenen Prozessdaten eines Bauprojekts.

Tabelle 1: *Drei Bauvorgänge aus den Prozessdaten eines Bauprojekts in Bezug zu den Bauteiltypen, Ergebnissen und ihren Abhängigkeitsbeziehungen*

Bauvorgang	Bauteiltyp	Ergebnis	Abhängigkeitsbeziehungen	Fertigungsrichtung
Bodenplatte herstellen	Bodenplatte	hergestellte Bodenplatte	-	***Dieser*** Bauabschnitt, ***dieses*** Geschoss
STB-30-Wand herstellen	STB-30-Wand	hergestellte STB-30-Wand	hergestellte Bodenplatte in ***diesem*** Geschoss, in ***allen*** Bauabschnitten, hergestellte Decke in ***vorherigem*** Geschoss, in ***allen*** Bauabschnitten	***Dieser*** Bauabschnitt, ***dieses*** Geschoss
Decke herstellen	Decke	hergestellte Decke	hergestellte STB-30-Wand in ***diesem*** Geschoss, in ***allen*** Bauabschnitten	***Vorheriger*** Bauabschnitt, ***dieses*** Geschoss

Jeder definierte Vorgang wird für alle Bauteile des Bauteiltyps, dem der Vorgang zugewiesen ist, in allen Bauabschnitten und Geschossen des Gebäudes durchgeführt. Die exakte Dauer des Vorgangs in einem bestimmten Bauabschnitt/Geschoss ist vor der Simulation nicht vorgegeben. Die Vorgangsdauer wird anhand der Menge der entsprechenden Bauteile, des zugeordneten Aufwandswerts und den zum Betrachtungszeitraum verfügbaren Ressourcen während der Simulation festgelegt. Das führt einerseits zur Untersuchung verschiedener Strategien bei der Ressourcenaufteilung, andererseits können die Kosten- und Zeitrisiken verschiedener Bauterminpläne mittels Simulation hervorgehoben werden.

Ein Bauvorgang, der in einem bestimmten Geschoss und Abschnitt des Gebäudes ausgeführt werden soll, ist im Petri-Netz mit einer Transition, einer Stelle und einer Kante abgebildet (Abb. 1). Die Transition repräsentiert den Bauvorgang selbst, während die Stelle den Systemzustand nach der Ausführung des Vorgangs darstellt. Beim Schalten der Transition wird eine Marke erzeugt, die durch die Kante fließt und dann in der Stelle abgelagert wird. Zusätzliche Kanten verknüpfen die Teilelemente des Netzes. Diese Kanten ermöglichen das Entfernen der Marken und bilden die technologischen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Bauvorgängen und deren Fertigungsrichtungen ab. Zusätzliche Transitionen zur Darstellung der Synchronisation der nebenläufigen Bauvorgänge werden ebenfalls erstellt.

Die Ressourcenbedürfnisse einzelner Bauvorgänge werden nicht in der Struktur des Netzes als extra Stellen und Kanten, sondern in der Guard-Funktion der entsprechenden Transitionen modelliert. Die Ressourcenmodellierung ist nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Der Detaillierungsgrad eines Modells, das prinzipiell eine vereinfachte Nachbildung der Realität ist, hängt von dem zu lösenden Problembereich ab. Das vorgestellte Modell des Petri-Netzes ist für die Erkennung von Terminüberschneidungen zwischen verschiedenen Bauaktivitäten ausreichend und ermöglicht die deterministische sowie stochastische Simulation der Bauprozesse. Allerdings fehlen den Standardelementen des Petri-Netz-Modells die kontextbezogenen Eigenschaften (z. B. die Menge der Bauteile in einem bestimmten Bauabschnitt/Geschoss und der zeitliche Aufwandswert eines Vorgangs), die zu sinnvollen Ergebnissen bei der Simulation führen. Deshalb sind den Elementen des Netzes Stereotypen zugeordnet, mit denen den Elementen weitere Daten zugewiesen werden können.

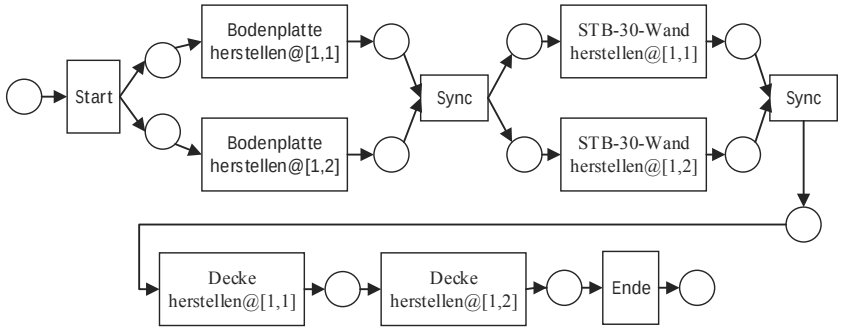


Abbildung 1: *Die in Tabelle 1 genannten Bauvorgängen für ein Geschoss und zwei Bauabschnitte, dargestellt als Petri-Netz*

Eine Steuerungskomponente führt das Petri-Netz aus. Während der Simulation, d. h. die Ausführung des Netzes, repräsentieren die Marken den Istzustand des Systems. Die Marken werden von der Steuerungskomponente geregelt. Vor dem Simulationsstart werden der Steuerungskomponente die in den Prozessdaten definierten Betriebsressourcen zugeordnet. Während der Simulation ist die Steuerungskomponente dafür verantwortlich, die Ressourcenkonflikte zwischen mehreren ausführbaren Vorgängen zu lösen. Ein Simulationslauf startet mit einer Marke in der Startstelle des Netzes und endet, sobald eine Marke in der Endstelle des Netzes abgelegt wird.

4.2 Zuordnung eines Versuchsplans zum Simulationsmodell

Die Parameterliste der zu untersuchenden Einflussgrößen eines Prozessmodells enthält:

- die Anzahl der verschiedenen Ressourcen (Fachkräfte, Betriebsmittel und -Geräte),
- die Bauverfahren, ihre Bauvorgänge und die entsprechenden technologischen Abhängigkeitsbeziehungen sowie
- die Anordnungsbeziehungen zwischen den Bauvorgängen.

Die Kombination der möglichen Einstellungen aller Modellparameter ergibt einen Versuchsplan, der aus einer Reihe von Petri-Netzen besteht. Jedes Petri-Netz entspricht einem Simulationslauf (Abb. 2, links).

Bei manchen Simulationsläufen des Versuchsplans wird nur die Anzahl der Ressourcen verändert. Dadurch bleibt die Struktur des Netzes gleich, da die Bauvorgänge und ihre Abhängigkeitsbeziehungen nicht verändert werden. Wenn sich nur die Marken der Simulationsläufe unterscheiden und differenziert zu betrachten sind, können diese Simulationsläufe simultan im gleichen Petri-Netz durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang wird das Konzept der Markenfarben eingeführt.

Jedem Simulationslauf ist eine Markenfarbe als Kennzeichnung zugeordnet. Vor dem Simulationsstart werden der Steuerungskomponente nun die definierten Betriebsressourcen eines Simulationslaufs unter einer spezifischen Farbe zugeordnet. Anhand dieser Farben kann die „stateless" Steuerungskomponente, die keine Zustandsinformationen speichert, die verschiedenen Simulationsläufe unterscheiden (Abb. 2, rechts).

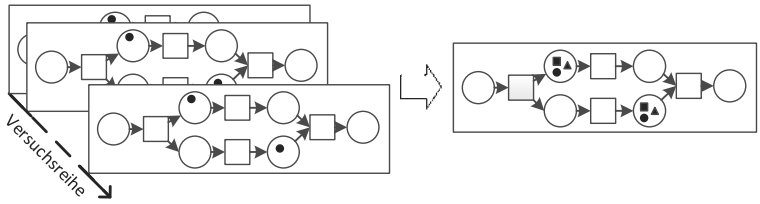


Abbildung 2: *Versuchsreihe, dargestellt durch Layers von Petri-Netzen (links). Die gleiche Versuchsreihe, dargestellt durch ein farbiges Petri-Netz (rechts)*

Ändert sich in anderen Simulationsläufen des Versuchsplans nicht nur die Anzahl der Ressourcen, sondern auch der Bauvorgang selbst einschließlich der Abhängigkeits- und Anordnungsbeziehungen, so ändert dies einen Teil der Netzstruktur (Abb. 3, links). Dennoch kann aus allen möglichen Petri-Netzen der verschiedenen Simulationsläufe ein einziges übergeordnetes Netz aufgebaut werden.

Jeder Kante ist eine Menge von Netznummern zugeordnet. Jede Netznummer zeigt an, zu welchem ursprünglichen Netz eine Kante gehört. Gleichzeitig ist jedem Simulationslauf eine entsprechende Netznummer zugeordnet, die auf die Nummer seines ursprünglichen Netzes hinweist. Diese zusätzlichen netzbezogenen Kennzeichnungen können ebenfalls als Farben betrachtet werden. Vor dem Simulationsstart werden der Steuerungskomponente demzufolge nicht nur die Ressourcen, sondern auch die Netznummer eines Simulationslaufs unter einer spezifischen Farbe zugeordnet. Dadurch kann die Steuerungskomponente weiterhin die verschiedenen Simulationsläufe mit ihren verschiedenen Parametereinstellungen unterscheiden (Abb. 3, rechts).

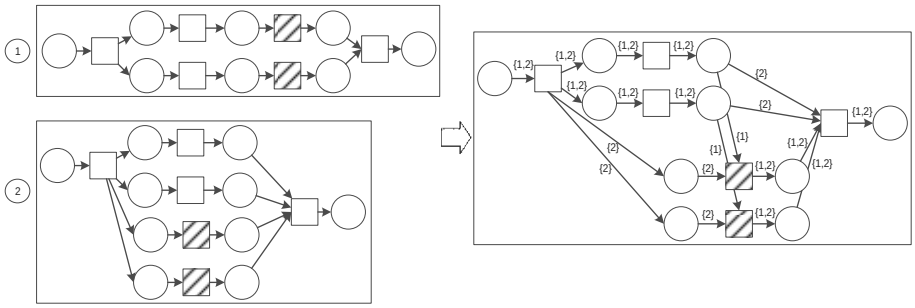


Abbildung 3: *Zwei Versuche mit zwei verschiedenen Anordnungsbeziehungen (links). Ein übergeordnetes Netz, das aus den beiden Petri-Netzen aufgebaut ist (rechts)*

Wie oben schon beschrieben wird ein Simulationslauf des Versuchsplans von einer Markenfarbe abgebildet. Die Anzahl der Markenfarben ist gleich der Anzahl der Simulationsläufe des Versuchsplans. Ein einzelnes, farbiges Petri-Netz ermöglicht den Durchlauf einer beliebigen Anzahl von Markenfarben (Abb. 4). Damit können alle Simulationsläufe eines Versuchsplans simultan durchgeführt werden.

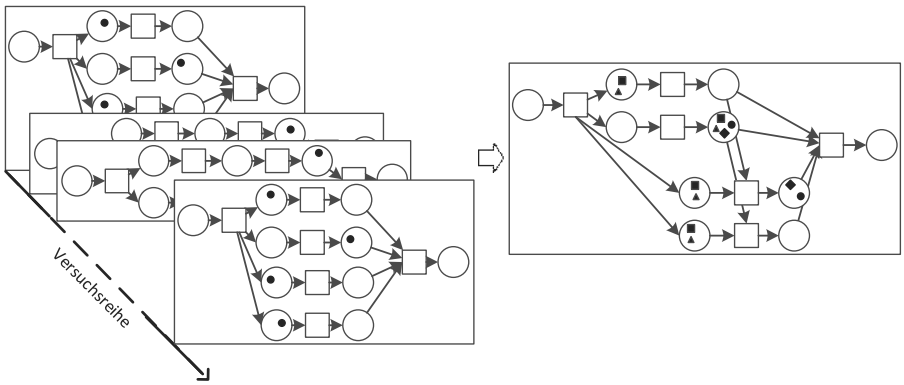


Abbildung 4: *Versuchsreihe, dargestellt durch Layers von verschiedenen Petri-Netzen (links). Die gleiche Versuchsreihe, dargestellt durch ein übergeordnetes farbiges Petri-Netz (rechts)*

Der beschriebene Ansatz zur simultanen Durchführung eines Experiments bedient sich der farbigen Petri-Netze. Damit lässt sich dieses Ansatzes nur bei einer Petri-Netz-basierten Terminplanung anwenden.

5 Analyse der Rechenzeit des vorgestellten Ansatzes

5.1 Aus theoretischer Sicht

Die Rechenzeit (R_{seq}) zur Erstellung und Ausführung des ganzen Versuchsplans ergibt sich bei einer sequenziellen Versuchsdurchführung zum einen aus der Anzahl

der Simulationsläufe (n) und zum anderen aus der Rechenzeit zur Erstellung (E_i) und Ausführung (A_i) jedes einzelnen Simulationslaufs (s. Gl. 1).

$$R_{seq} = \sum_{i=1}^{n} \left(E_i + A_i \right) \tag{1}$$

Bei der simultanen Vorgehensweise wird die Rechenzeit (R_{sim}) zur Erstellung des übergeordneten Netzes als (E') bezeichnet. Da die Alternativen des Systems eine strukturelle Ähnlichkeit aufweisen, werden zahlreiche Elemente des Petri-Netzes nicht neu erstellt. Bei der Erstellung der Alternativen, die durch die Veränderung der Anzahl der Ressourcen bedingt sind, werden die $(n-1)$-mal Rechenzeiten zur Erstellung des gleichen Netzes erspart. Ändert sich ein Teil des Netzes aufgrund der Änderung der Bauvorgänge einschließlich deren Abhängigkeitsbeziehungen und Fertigungsrichtungen, werden die Rechenzeiten zur Erstellung der gleichen Elemente des Petri-Netzes eingespart. Demzufolge wird sich die Rechenzeit zur Erstellung des ganzen Versuchsplans reduzieren.

Die Anzahl der zu simulierenden Ereignisse bei einer simultanen Vorgehensweise ist gleich der Anzahl der Ereignisse bei einer sequenziellen Vorgehensweise. Deshalb entspricht auch die Rechenzeit zur Ausführung eines simultanen Versuchsplans dem zeitlichen Aufwand bei einer sequenziellen Vorgehensweise. Allerdings ist hier der Aufwand zusätzlicher Operationen (O') zur Erkennung und Trennung der Simulationsläufe anhand einzelner Farben zu berücksichtigen.

Die Rechenzeit zur Erstellung und Ausführung des ganzen Versuchsplans wird bei einer simultanen Versuchsdurchführung wie folgt berechnet (s. Gl. 2):

$$R_{sim} = E' + \sum_{i=1}^{n} A_i + O' \tag{2}$$

Eine mögliche Einsparung der Rechenzeit kann sich aus der strukturellen Ähnlichkeit der Systemalternativen ergeben. Diese Einsparung in der Rechenzeit hängt stark von den verschiedenen Eingaben der Modellparameter bzw. von den Prozessdaten ab. Dennoch ist bei diesem Ansatz davon auszugehen, dass die Herangehensweise der Anwender bei der Festlegung der Bauvorgänge und deren technologischen und organisatorischen Abhängigkeitsbeziehungen rational bzw. realitätsnah ist.

5.2 Aus praktischer Sicht

Der vorgestellte Simulationsansatz wurde bereits bei einem viergeschossigen Gebäude eingesetzt. Das Bauwerk untergliedert sich in insgesamt vier Bauabschnitte. Das Gebäudemodell ist in AutoCAD Architecture gezeichnet und enthält Objekte von 24 verschiedenen Bauteiltypen, die einer Menge von 60 Bauvorgängen in den Prozessdaten zugeordnet sind. Die Bauvorgänge sind den Gewerken Mauerarbeiten, Beton- und Stahlbetonarbeiten und Stahlbauarbeiten zugeordnet. Die Verfügbarkeit des zugehörigen Personals auf der Baustelle bestimmt die Dauer der Bauvorgänge. Das aus den Produkt- und Prozessdaten generierte Petri-Netz enthält insgesamt 599 Transitionen, davon 462 Bauvorgänge, die in den verschiedenen Bauabschnitten und Geschossen des Gebäudes

durchgeführt werden sollen. Für die Simulation wurde angenommen, dass sowohl die Betriebsmittel als auch die Baumaterialien unbegrenzt verfügbar sind. Für jedes Gewerk wurden zwei Arbeitsgruppen definiert. Die Prozessdaten wurden über CiSmo in der CAD-Umgebung eingegeben und stammen aus dem realen Bauablaufplan des Bauprojekts. Die Bauprozesse werden mit der Simulationsumgebung „Modeling Objects & Simulation Agents in Construction Management“ (MOSAICA) ausgeführt (Samkari et al. 2012b). MOSAICA realisiert den vorgestellten Ansatz und ermöglicht die sequenzielle sowie die simultane Durchführung verschiedener, Petri-Netz-basierter Simulationsläufe.

Eine Menge von 100 verschiedenen Alternativen, bedingt durch die Veränderung der Arbeitsgruppengröße der Fachkräfte wurde sequenziell und simultan jeweils 5-mal durchgeführt. Die Untersuchung bei der sequenziellen Vorgehensweise besteht aus 100 Versuchsplänen jeweils mit einem Simulationslauf, wobei die Untersuchung bei der simultanen Vorgehensweise aus einem Versuchsplan mit 100 Simulationsläufen besteht. Anhand einer in MOSAICA integrierten Zeitmessungskomponente wurden die Zeiten der Erstellung des Versuchsplans sowie der Ausführung des Versuchsplans aufgenommen.

Die Rechenzeit zur Erstellung des Versuchsplans (E') betrug basierend auf den Untersuchungsbedingungen im Durchschnitt drei Sekunden und ist damit im Vergleich zur Erstellung bei einer sequenziellen Vorgehensweise mit einer Durchlaufzeit von 65 Sekunden um 95 % reduziert worden. Die Rechenzeit zur Ausführung eines Versuchsplans betrug ungefähr eine halbe Sekunde und ist ungefähr 10 % aufwendiger als die nacheinander durchgeführten Simulationsläufe, die insgesamt 0,4 Sekunden gebraucht haben. Dieser Prozentsatz stellt die Rechenzeit zusätzlicher Operationen (O') zur Erkennung und Trennung der einzelnen Simulationsläufe dar.

Das gleiche Bauprojekt, d. h. die gleichen Produkt- und Prozessdaten, wurden von Kugler (2012) unter den gleichen Bedingungen anhand von 10 Simulationsexperimenten in einer zeitgesteuerten Simulationsumgebung durchgeführt. Die Laufzeit eines einzelnen Simulationslaufs betrug durchschnittlich 9,7 Minuten (ohne Animation).

5.3 Diskussion der Rechenzeit

Bei der Simulation im Hochbau ist eine Zeiteffizienz zur Durchführung eines Versuchsplans entscheidend. Sie erlaubt zum einen die Berücksichtigung noch umfangreicherer Modelle in Bezug auf die Anzahl der Modellparameter und die Anzahl der im Gebäudemodell enthaltenen Bauobjekte. Zum anderen ermöglicht die Zeiteffizienz die Untersuchung noch mehrerer Planungsvarianten, wodurch ein noch größerer Teil des Suchraums der Simulationsstudie binnen der kurzen, zur Verfügung stehenden Zeit der Systemanalyse mittels Simulation abgedeckt wird.

Jede mögliche Rechenzeitersparnis wirkt als positiver Effekt auf dem Arbeitsablauf, wenn die gleichen Simulationsergebnisse erreicht werden. Die dargestellte Untersuchung zeigt, dass die Rechenzeit der Simulationsdurchführung durch die simultane Durchführung des Versuchsplans reduziert werden kann, da eine Ersparnis der Rechenzeit zur Erstellung des ganzen Versuchsplans erreicht wird. Zudem zeigt die Untersuchung, dass die Steigerung der Zeiteffizienz grundsätzlich bei der Entwicklung des Simulationsmodells berücksichtigt werden sollte.

Außerdem weist die Untersuchung darauf hin, dass sich die ereignisgesteuerte Simulation im Allgemeinen und die ereignisgesteuerte Simulation mittels eines farbigen Petri-Netz-Modells im Besonderen für die Analyse von Bauprozessen im Hochbau hinsichtlich der effizienten Durchführung des Versuchsplans besser als die zeitgesteuerte Simulation eignet. Da bei der Petri-Netz-basierten Simulation nur diejenigen Transitionen betrachtet werden, deren Eingangsstellen mit einer Marke belegt sind, kann eine relativ hohe Ersparnis der Rechenzeit bei der Ausführung des Versuchsplans erzielt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neuer Simulationsansatz zur simultanen Durchführung eines Versuchsplans vorgestellt, indem ein Versuchsplan mit einem einzelnen, farbigen Petri-Netz abgebildet wurde. Ziel des Ansatzes ist die effiziente Durchführung eines Simulationsexperiments im Hochbau. Mithilfe dieser Möglichkeit kann die Anwendung der Simulation in der Arbeitsvorbereitung im Hochbau weite Verbreitung in der Baupraxis erlangen. Die Erstellung des Petri-Netzes aus den Produkt- und Prozessdaten sowie die Gruppierung aller Netze in einem übergeordneten Netz wurden detailliert beschrieben. Enthalten die Systemalternativen eine strukturelle Ähnlichkeit, wird eine erhebliche Einsparung der Rechenzeit zur Erstellung des Versuchsplans erzielt. Dies zeigten die Ergebnisse des praktischen Einsatzes des vorgestellten Ansatzes bei einem viergeschossigen Gebäude innerhalb der diskreten, ereignisgesteuerten Simulationsumgebung MOSAICA.

Weitergehende Arbeitsschritte können der Untersuchung vorhandener Simulationsmodelle und -ansätze im Hochbau hinsichtlich der nicht-funktionalen Anforderungen, wie z. B. die Flexibilität der Bauprozessmodellierung und die intuitive Interpretation der Simulationsergebnisse, dienen.

Literatur

AbouRizk, S.M.; Hague, S.: An overview of the COSYE environment for construction simulation. In: Rossetti, M.D.; Hill, R.R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls, R.G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), Austin (USA), 13.-16. December 2009, S. 2624-2634.

Chahrour, R.: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Kassel, kassel university press 2006.

Enge, F.; Huhnt, W.: Muster in Prozessen der Bauablaufplanung - Ein Branch-and-Bound-Verfahren zur Mustererkennung in Planungs- und Ausführungsprozessen. In: Huhnt, W. (Hrsg.): Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen, Technische Universität Berlin (6), 2010.

Franz, V.: Planung und Steuerung komplexer Bauprozesse durch Simulation mit modifizierten höheren Petri-Netzen. Kassel, Gesamthochschule Kassel 1989.

König, M.; Beißert, U.: Constraint-basierte Simulation von Bauprozessen. In: Bargstädt, H.J. (Hrsg.): Tag des Baubetriebs 2008 - Auf dem Weg zum digitalen (Bau-)Haus-Bau - Forschungsworkshop zur Simulation von Bauprozessen, Bauhaus Universität Weimar, 31. März 2008, S. 17-36.

Kugler, M.: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Kassel, kassel university press 2012.

Mejtsky, G. J.: A metaheuristic algorithm for simultaneous simulation optimization and applications to traveling salesman and job shop scheduling with due dates. In: Henderson, S.G.; Biller, B.; Hsieh, M.-H.; Shortle, J.; Tew, J. D.; Barton, R. R. (Hrsg.): Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, DC (USA), 09.-12. December 2007, S. 1835-1843.

Rueppel, U.; Meissner, U.F.; Greb, S.: A Petri Net based Method for Distributed Process Modelling in Structural Engineering. In: Bargstädt, H.J.; Blickling, A. (Hrsg.): Proceedings of the Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE), Weimar (Germany), 02.-04. June 2004.

Samkari, K.; Franz, V. (2012a) A Petri net based method for the early verification & validation of a simulation study in construction management. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin (Germany), 09.-12. December 2012, S. 344:1-344:2.

Samkari, K.; Kugler, M.; Kordi, B.; Franz, V. (2012b) Colored Petri-net and Multi-Agents: A Combination for a Time-efficient Evaluation of a Simulation Study in Construction Management. In: Issa, R.R.; Flood, I. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, Florida (USA), 17.-20. June 2012, S. 153-160.

Sanchez, S. M.; Wan, H.: Work smarter, not harder: A tutorial on designing and conducting simulation experiments. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin (Germany), 09.-12. December 2012, S. 170:1-170:15.

Scherer, R.; Ismail, A.: Process-based simulation library for construction project planning. In: Jain, S.; Creasey, R.R.; Himmelspach, J.; White, K.P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC), Arizona (USA), 11.-14. December 2011, S. 3493-3504.

Schopbach, H.: Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden. Kassel, kassel university press 2001.

Schruben, L. W.: Simulation optimization using simultaneous replications and event time dilation. In: Andradóttir, S.; Healy, K.J.; Withers, D.H.; Nelson, B.L. (Hrsg.): Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (WSC), Atlanta (USA), 07.-10. December 1997, S. 177-180.

VDI 3633 - Blatt 3 (1997). Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Experimentplanung und -auswertung, Blatt 3, Richtlinie, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik, VDI 3633, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1997.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Methodik für ein simulationsgestütztes logistikintegriertes Projektmanagement im Anlagenbau

A simulation-based approach for logistic-integrated project-management for plant engineering

Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany), s.wenzel@uni-kassel.de
Christoph Laroque, Universität Paderborn, Paderborn (Germany), christoph.laroque@hni.upb.de

Abstract: Planning and construction of one-of-a-kind products depend always on specific constraints on the customer's site and requirements. Fulfilling contracted due dates and safeguarding the entire process is of highest relevance for the manufacturing companies. However, material flow simulation is mostly not used regularly for the critical assessment of project risks and especially for the relevant logistical processes. This paper describes the first results of a research project aiming at these issues by developing a method for simulation-based project management integrating relevant logistical aspects. After presenting the state-of-the-art in this area, the consortiums requirements are as well presented as a first technical architecture for a decision support toolset. Implemented demonstrations for a simulation-based rating of project plans are discussed and further steps in the research project are pointed out.

1 Motivation und Ausgangslage

Der kundenindividuelle Anlagenbau unterscheidet sich von der stationären Serienfertigung dadurch, dass eine Anlage in der Regel als Unikat in Form einer Baustellenfertigung an verschiedenen Standorten realisiert wird. Die Planung eines derartigen Projektes zur Anlagenrealisierung und -inbetriebnahme ist somit stets in Abhängigkeit von den systemtechnischen und konstruktiven Randbedingungen der Anlage, den lokalen Standortgegebenheiten, den organisatorischen Projektvorgaben (z. B. Bauabschnitte, Produktionsschritte oder Ressourcendisposition) sowie den damit verbundenen logistischen Restriktionen durchzuführen. Die Sicherstellung der zeitlichen Machbarkeit einer Baumaßnahme und die Robustheit der Projektpläne unter Berücksichtigung aller kundenindividuellen Restriktionen auch bei unvermeidbaren Störungen (z. B. aufgrund von fehlendem Material) sind von entscheidender Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit der an den Baumaßnahmen

beteiligten Unternehmen und ihre Positionierung am Markt. Vor Projektbeginn sowie projektbegleitend muss daher eine Bewertung der Pläne erfolgen, um auf geänderte Randbedingungen in der Produktion oder in Bezug auf das Produkt (die Anlage) reagieren zu können. Zur Festlegung der Projektpläne ist die Einbeziehung der logistischen Prozesse entscheidend, da die Liefertermine meist mit Unsicherheiten versehen sind und z. B. abhängig von den lokalen Gegebenheiten beim Kunden Umsetzungsrisiken bergen können.

Eine umfassende Werkzeugunterstützung findet sich im kundenindividuellen Anlagenbau heute in erster Linie bei der Planung der Anlage selbst. Hier kommen Methoden zur Konstruktion, Simulation, Optimierung und Visualisierung zum Einsatz (zu einem Überblick vgl. beispielsweise Bracht et al. 2011). Die Projektplanung zur Realisierung und Inbetriebnahme einer Anlage wird hingegen oftmals nur mit einfachen Methoden des Projektmanagements (DIN 69901-3 2009) oder der Netzplantechnik (vgl. auch DIN 69900 2009) durchgeführt. Dies ist unzureichend, da diese Werkzeuge die zeitlichen Unsicherheiten der Logistik und des Plans insgesamt nicht abbilden, diesbezüglich kritische Ketten nicht erkennen und die Robustheit von Projektplänen somit nicht bewerten können.

Die im Rahmen dieses Beitrags betrachteten Projekte im Anlagenbau zur Energie-, Kraftwerk- und Umwelttechnik sind neben der Individualität des Produktes insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass jedes Einzelprojekt beim Kunden aufgebaut und unter spezifischen logistischen Herausforderungen abgearbeitet werden muss. Darüber hinaus nehmen die Zeiten, die für die Planung, Ausführung und Inbetriebnahme zur Verfügung stehen, stetig ab, damit den Kunden eine schnellere Amortisation der Investitionskosten ermöglicht werden kann. Im Bereich der Konstruktion und Projektdurchführung ist im Anlagenbau genügend Expertise zur Herstellung der Produkte durch die Fachexperten vorhanden. Speziell der Bereich der Planung der Anlagenrealisierung bietet aber noch weiteres Optimierungspotential, um insbesondere auch die logistischen Aspekte zu verbessern. Deren Verkettung und Komplexität führen zu einer erschwerten Planbarkeit des individuellen Projektes beim Kunden. Viele Projektleiter organisieren überdies mehr als ein konkretes Projekt und müssen spezielle Engpassressourcen (z. B. Personal mit einem speziellen Fachwissen) über mehrere Projekte oder in Abstimmung mit ihren Kollegen koordinieren und planen. Hierdurch wird die Komplexität einer Gesamtplanung weiter gesteigert.

Der vorliegende Beitrag stellt ausgehend von den aktuellen Entwicklungen zum Stand der Forschung in diesem Bereich, aber auch in artverwandten Bereichen des Bauwesens, des Schiffbaus und des Maschinenbaus (vgl. Kap. 2), erste Ergebnisse eines gemeinsamen Forschungsvorhabens der Universitäten Kassel und Paderborn vor, das den oben ausgeführten Defizite des Projektmanagements im Anlagenbau durch eine ergänzende Betrachtung logistischer Prozesse innerhalb des Projektmanagements begegnen will und die Entwicklung einer Methodik für ein simulationsgestütztes logistikintegriertes Projektmanagement im Anlagenbau zum Ziel hat. In Kapitel 3 werden zunächst die im Anlagenbau bestehenden Anforderungen kurz erläutert. Im anschließenden Kapitel 4 wird eine technische Architektur diskutiert und ein erstes prototypisches Lösungskonzept zur Simulation von Projektplänen vorgestellt. Angaben zu weiteren ausstehenden Arbeiten des auf zwei Jahre ausgelegten Forschungsvorhabens runden den Beitrag ab.

2 Einsatz der Simulation in der Projektplanung kundenindividueller Unikate

Die in der Serienfertigung für die Absicherung der Logistik schon seit vielen Jahren im Einsatz befindliche ereignisdiskrete Ablaufsimulation wird bei der Realisierung von kundenindividuellen Einmalprodukten nur vereinzelt eingesetzt, dann jedoch sehr erfolgreich. Interessante Entwicklungen finden sich vor allem im Bauwesen (vgl. Chahrour 2007; Weber 2007; Zülch und Börkircher 2007; Günthner und Kraul 2008; Wimmer et al. 2010; Günthner und Bormann 2011; Kugler 2012; Mefisto 2013) und im Schiffbau (vgl. beispielsweise Steinhauer et al. 2007; Steinhauer 2008 und 2011; Beißert et al. 2010; SimCoMar 2013 oder auch SIMoFit 2013).

Diese Forschungsarbeiten zeigen, dass die Betrachtung logistischer Fragestellungen in Kombination mit der Projektplanung nicht ganz neu ist, jedoch mit Simulationsunterstützung bisher vor allem in den Bereichen Bauwesen (Hoch- und Tiefbau) und Schiffbau erfolgen und sich – mit Ausnahme des Schiffbaus – auf Forschungsvorhaben und Einzelanwendungen beziehen. Im Bereich der operativen Steuerung von komplexen Montagesystemen finden zusätzlich Entwicklungen fokussiert auf die Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung statt, beispielsweise auf der Basis von Netzplänen, die um heuristische Verfahren erweitert sind (vgl. z. B. Majohr et al. 2008; Schmidt et al 2009; Völker et al. 2009).

Für die Bauplanung gibt es erste Softwarewerkzeuge, die über eine einfache Projektsimulation und Visualisierung die Planung und Steuerung von Großbaustellen unterstützen, indem sie Ereignisse auf dem Lageplan der Baustelle in ihrer zeitlichen Abfolge sichtbar machen (vgl. Afinion 2013). Hierbei handelt es sich allerdings in erster Linie um eine Verknüpfung von Lage- und Terminplan zur Visualisierung ortsveränderlicher Prozesse entlang der Zeitleiste und nicht um eine Simulation der logistischen Zusammenhänge. Andere Werkzeuge dienen der Weg-Zeit-Planung beispielsweise im Straßen-, Gleis-, Tunnel-, Pipeline- und Wasserbau; sie führen alle Informationen zum Bauablauf in entsprechenden Weg-Zeit-Diagrammen zusammen (vgl. TILOS 2013). Einen allgemeinen prozessorientierten Ansatz verfolgt das Werkzeug OTD-PM (vgl. Fraunhofer 2013); hier sollen die Abbildung und Simulation des Projektablaufs mit seinen Ressourcen einschließlich der logistischen Zulieferprozesse über eine Prozesskettenmodellierung in einem separaten Werkzeug parallel zur Projektplanung möglich sein. Auf Basis des Simulators ProModel wird ebenfalls ein Projektsimulator angeboten, der auf Basis von Projektplänen unterschiedliche Szenarien simulieren und analysieren kann (vgl. ProModel 2013). Im akademischen Bereich finden sich Ansätze der Abbildung von Unsicherheiten mittels der Monte-Carlo-Simulation (vgl. Kwak und Ingall 2007). Das Simulationsprogramm Simultrain® (vgl. SIMULTRAIN 2013) dient zu Schulungszwecken von Führungspersonal. Der Benutzer versetzt sich in die Lage eines Projektleiters und trifft Entscheidungen über Projektstruktur und -ablauf mit Hilfe von Managementwerkzeugen. Der Projektablauf ist dabei fest vorgegeben und wird über dynamische Ereignisse wie beispielsweise Krankmeldungen von Mitarbeitern beeinflusst.

Obwohl vereinzelt Werkzeuge zur Simulation von Unsicherheiten in der Projektplanung (z. B. Liefertermine) existieren, werden Unsicherheiten heute im Anlagenbau immer noch fast ausschließlich über die manuelle Integration von zusätzlichen Pufferzeiten in die Projektpläne berücksichtigt. Dies liegt darin

begründet, dass es im Bereich der Projektsimulation heute keine Simulationssoftware gibt, die auf die Bedarfe der KMU im Anlagenbau zugeschnitten ist, mehrere Projektplanungsalternativen gegenüberstellt und zudem logistische Prozesse mittels einer Ablaufsimulation integriert.

3 Anforderungen an die Methodik

Die geplante Methodik zur Bewertung und Verbesserung von Projektplänen für die Anlagenrealisierung und -inbetriebnahme muss neben der eigentlichen Projektplanung sowohl die Unsicherheiten in einzelnen Planungsschritten als auch die logistischen Aspekte (Fläche, Ressourcen sowie notwendige Transport-, Lager-, Bereitstellungs- und Umschlagprozesse) berücksichtigen. Im Einzelnen sollen folgende methodische Ergänzungen zu den heute in der Praxis verwendeten Projektplanungsmethoden erreicht werden:

- Erweiterung von Projektplänen in Form von Flussdiagrammen, Gantt-Charts oder Netzplänen um simulationsbasierte Methoden zur Risikobewertung eines individuellen Projektplans.
- Verbesserung der Planung durch Ablaufsimulation logistischer Prozesse und Risikobewertung als Entscheidungsunterstützungsfunktionen.
- Verbesserung des Gesamtportfolios der Projektplanung (Durchführung eines Multi-Projektmanagements).
- Verbesserung der Projektüberwachung und Reaktion auf Planänderungen.
- Automatische Erzeugung alternativer Projektpläne.
- Verbesserte Projektüberwachung durch 3D-Baufortschrittsvisualisierung.
- Systematische Ablage von Projektdaten zur Wiederverwendung und kontinuierliche Verbesserung der Planungsdatenqualität durch Rückführung der Ist-Daten aus den Planungsprozessen und Verwaltung von Erfahrungswerten vergangener Projekte.

Die spezifischen Anforderungen der über einen projektbegleitenden Ausschuss in das Forschungsvorhaben eingebundenen Unternehmen ergänzen die obigen Anforderungen:

- Unterstützung einer disziplinübergreifenden Zusammenarbeit, Schaffung von Transparenz und Verantwortlichkeiten.
- Einbindung von Erfahrungswissen aus vorangegangenen Projekten (aus Projekten lernen).
- Schaffung einer gültigen Datenbasis, automatische Integration der Daten in eine Projektplanungsmethodik und Vernetzung zum Beispiel mit einem unternehmensinternen ERP-System (ERP: Enterprise Resource Planning).
- Optionale Einbindung von GIS- und Wetterdaten in Abhängigkeit von Produkt und Fertigung (GIS: Geographisches Informationssystem).

Kontrovers wird in den Unternehmen allerdings die automatische Generierung von Bauanleitungen als Unterstützung des Montage- und Bauprozesses diskutiert. Diese Anforderung hängt stark von spezifischen Restriktionen ab, beispielsweise der Vergabe des Montage- oder Bauprozesses an Drittfirmen, ggf. sogar im Ausland, mit jeweils neuem Personal pro Projekt.

Eine zwingende Voraussetzung zur Erreichung einer hohen Akzeptanz der zu entwickelnden Methodik ist gemäß den Mitgliedern des projektbegleitenden

Ausschusses, dass die Projektpläne weiterhin mit den heute in den jeweiligen Unternehmen eingesetzten Methoden zu erstellen sind; gleichzeitig sollen die Methoden sinnvoll vernetzt und qualitativ hochwertige Analysen integriert werden. Erste Interviews in den beteiligten Unternehmen des Anlagenbaus zur Energie-, Kraftwerk- und Umwelttechnik zeigen allerdings, dass die verwendeten Projektmanagementpläne und Planungsprozesse stark abhängig sind von der Unternehmensgröße, dem Projektvolumen und dem zu erstellenden Produkt selbst. Die Bandbreite der eingesetzten Methoden reicht von Prozessstrukturplänen, Meilensteinplänen, Netzplänen, Gantt-Charts, Ressourcen-, Kosten- und Risikodiagrammen, Fertigungsplänen bis hin zu Excel-Listen, wobei einzelne Pläne ggf. gar nicht (regelmäßig) zum Einsatz kommen. Eine ergänzende detaillierte Bestandsaufnahme soll daher in den nächsten Monaten klären, welche Gründe für oder gegen den Einsatz der jeweiligen Methoden sprechen.

Um dem Wunsch der Unternehmen nach einem transparenten Projektmanagementprozess nachzukommen und auch die Einbindung von Erfahrungswissen aus vorangegangenen Projekten zu ermöglichen, wird zum einen im Sinne eines Workflows ein Vorgehensmodell zur logistikintegrierten Projektplanung definiert, zum anderen werden sogenannte Referenzprojektpläne mit den jeweiligen produkt-, technologie-, prozess- oder auch ressourcenbedingten Restriktionen formuliert. Mit ihnen kann auch die potentiell erreichbare Qualität der Planungsergebnisse bestimmt und die Ermittlung angemessener Detaillierungsgrade der Logistikmodelle festgelegt werden, die für die Planung der logistischen Prozessschritte genutzt werden.

4 Prototypisches Lösungskonzept

Die in dem Projekt erarbeiteten Teilergebnisse werden in eine technische Gesamtkonzeption eingebettet, um die einzelnen Teilergebnisse jeweils konsistent zu halten und im Ergebnis des Forschungsprojektes eine integrierte Lösung zu realisieren. Basis dieser Integrationen ist ein Entwurf zur Gesamtarchitektur, der im folgenden Abschnitt kurz beschrieben wird.

4.1 Architekturentwurf

Die entwickelte Methodik wird als werkzeugneutrale Integration von Logistikprozess- und Projektmanagement mit automatischer Modellgenerierung konzipiert und erlaubt eine Anpassung auf die operativen Entscheidungsanforderungen der KMU. Sie soll im Wesentlichen zeitliche und räumliche Gegebenheiten besser berücksichtigen sowie eine semi-automatische Erzeugung, simulative Absicherung und Optimierung von Projektplänen in Abhängigkeit von Anlagenkomponenten, Liefertermin und Lieferort bieten. Eine Ablaufsimulation logistischer Prozesse zur Bewertung dieser spezifischen Risiken in den Projekten wird integriert; der jeweilige Projektfortschritt wird in 3D-Modellen der zukünftigen Anlagen visualisiert. In einer weiteren Ausbaustufe wird die simulationsgestützte Optimierung mehrerer Projekte ermöglicht.

Abbildung 1 zeigt einen ersten Entwurf der technischen Gesamtarchitektur auf Basis eines in der Applikationsanwendung üblichen 4-Ebenen-Architektur (vgl. z. B. Hess et al. 2006).

Auf der Ebene der Bestandskomponenten finden sich die relevanten Projekt- und Produktdaten, Projekthistorien sowie alle zusätzlichen externen Datenbanken (in Abb. 1 dunkelgrau dargestellt, z. B. Wetterdaten). Die Daten der Bestandkomponentenebene werden von einzelnen Funktionskomponenten genutzt, die über die Prozesskomponenten mit den Anwendern (über die Interaktionskomponenten) sowie untereinander kommunizieren. Die anfallende Datenkommunikation ist aus Übersichtlichkeitsgründen nicht dargestellt.

Die Ebene der Funktionskomponenten beziehen sich auf die Bereitstellung von Funktionen zur Projektplanerstellung, -simulation und -optimierung, zur Logistiksimulation, zur 3D-Visualisierung, zur Ableitung von Referenzprojektplänen aus Erkenntnissen von bereits durchgeführten Projekten sowie zur mitführenden und nachgelagerten statistischen Auswertung von Projekt- und Logistikszenarien. Einzelne Funktionskomponenten werden über bereits am Markt zur Verfügung stehende Werkzeuge umgesetzt. Der Schwerpunkt der Umsetzung dieser Ebene liegt somit auf der der Integration vorhandener Softwareprodukte.

Auf der Ebene der Prozesskomponenten unterstützt ein Vorgehensmodell zur logistikintegrierten Projektplanung den Aufruf der einzelnen Funktionskomponenten und dient als Verfahrensgrundlage für die Ausführung der jeweiligen Teilaufgaben.

Die Ebene der Interaktionskomponenten stellt über eine Bedienoberfläche dem Anwender die Modellierungs-, Simulations-, Analyse- und Visualisierungsassistenz zur Verfügung.

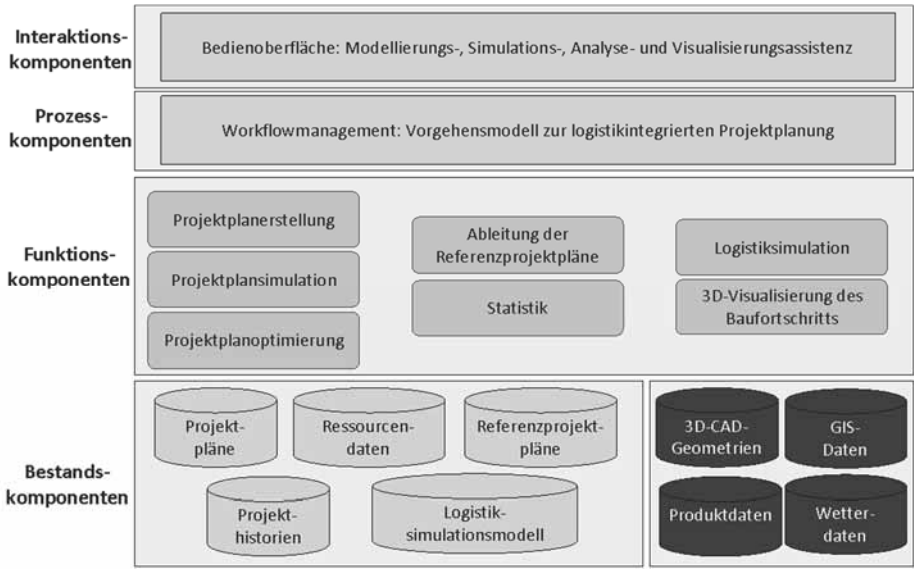


Abbildung 1: *Entwurf einer integrierten Gesamtarchitektur*

Der im Rahmen des Forschungsvorhabens geplante Demonstrator unterliegt der in Abbildung 1 dargestellten Gesamtarchitektur. Die Bestandskomponenten sowie die Werkzeuge auf der Ebene der Funktionskomponenten orientieren sich an den Bedarfen der beteiligten Unternehmen und den dort existierenden Werkzeugen. Das

Vorgehensmodell zur logistikintegrierten Projektplanung überführt die typischen Projektmanagementvorgehensweisen bei den beteiligten Unternehmen zu einem gemeinsamen Vorgehensmodell. Ziel ist eine unternehmensspezifische Adaption in den einzelnen Schritten des Vorgehensmodells.

4.2 Zusammenspiel von Projekt- und Logistiksimulation

Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt liegt der Unterschied des hier vorgestellten Ansatzes zu den heute existierenden Werkzeugen der Projektplanung in der exakteren Planung von Unsicherheiten. Die heutige manuelle Planung von Pufferzeiten in den Projektplänen führt zu hohem Pufferzeitbestand, dessen Reduktion bei der Projektabwicklung zu keinerlei positiven Effekten bei Nichtausnutzung dieser Pufferzeit führt. Mittels des integrativen Ansatzes sollen die notwendigen Pufferzeiten für logistische Aufgaben konkretisiert werden. Hierzu werden diese zunächst auf Basis von Logistiksimulationen ermittelt und dann als Vorgaben in den Projektplan zurückgeführt. Im Anschluss kann der Projektplan einer Simulation unterzogen und entsprechend verbessert werden. Bei Veränderung des Projektplans können diese erneut an die Logistiksimulation weitergeleitet werden. Grundlage der Logistiksimulationen sind die für die KMU des Anlagenbaus ermittelten Logistikprozesse, die genutzt werden, um die jeweiligen Logistikmodelle in einem konkreten Projekt zu generieren.

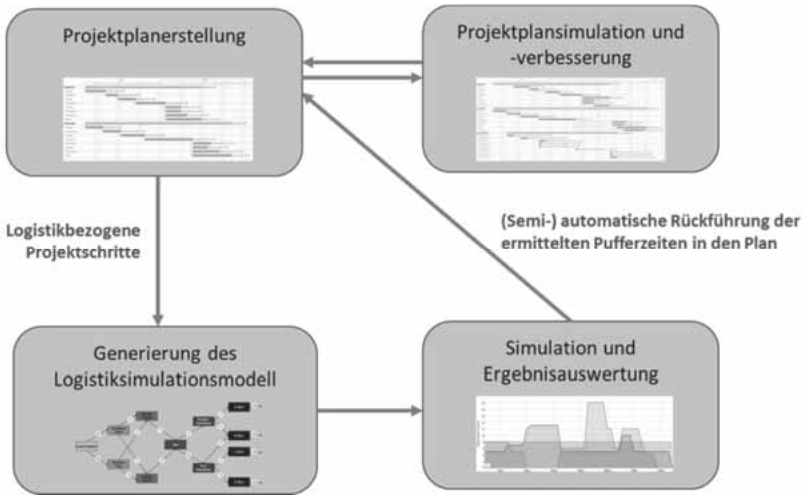


Abbildung 2: *Projekt-und Logistiksimulation*

4.3 Prototypische Projektsimulation

Zu Demonstrationszwecken wurde bereits in einem ersten Schritt die simulative Absicherung von Projektplänen realisiert. Einzelne Projektschritte werden auf Basis unterschiedlicher Aufgabentypen zu komplexen Projekten mit internen Abhängigkeiten modelliert und mittels der Monte-Carlo-Simulation hinsichtlich der Robustheit des Gesamtplans überprüft. Projekte sind in der dafür erstellten Datenstruktur die zu simulierenden Instanzen. Sie werden mindestens aus einem Anfangsdatum, einem geplanten Enddatum und einem verantwortlichen Projektleiter

beschrieben. Weiterhin bestehen Projekte aus einer beliebigen Anzahl von beteiligten Vorgängen. Jeder Vorgang wird neben Standardattributen wie *ID* (Bezeichnung) und Querverknüpfungen wie bspw. *P_ID* (Projektbezug) auch über die verwendeten Ressourcen beschrieben, um später Kapazitäten zu berücksichtigen und Auslastungen zu ermitteln. Um Unsicherheiten in der Schätzung zu quantifizieren, wird für jeden Vorgang eine minimale und maximale Laufzeit als Parameter eingeführt. Beispielsweise wäre ein Projektleiter bei einer Eingabe von 5 bis 10 Tagen mit seiner Schätzung unsicherer als bei einer Eingabe von 5 bis 6 Tagen. Eine weitere Parameterkombination ist das Start- bzw. Enddatum eines Vorgangs. Durch diese können im Projektplan feste Termine, Meilensteine oder Deadlines verankert werden. Weiterhin kann jedem Vorgang ein logischer Vorgänger zugeordnet werden, um Abhängigkeiten zwischen einzelnen Vorgängen zu modellieren. Das gesamte Projekt kann in einem Gantt-Diagramm dargestellt werden.

Die Projekte können mittels einer einfachen webbasierten Bedienoberfläche modelliert und beschrieben werden. Klassische Visualisierungen wie ein Gantt-Diagramm zeigen die erstellten Projektpläne an, wobei hierfür jeweils die Mittelwerte der Länge der Projektvorgänge verwendet werden. Zunächst wahlweise unter Verwendung von Normal- oder Gleichverteilung werden die einzelnen Projektvorgänge mittels Zufallsexperimenten simuliert und zu stochastischen Projektplänen zusammengesetzt. Die Reihenfolge der einzelnen Vorgänge bleibt hier bisher unverändert. Über alle Experimente hinweg bietet die Bedienoberfläche Datenanalysemöglichkeiten und Visualisierungsdiagramme, um die Robustheit der jeweiligen Projektpläne beurteilen zu können.

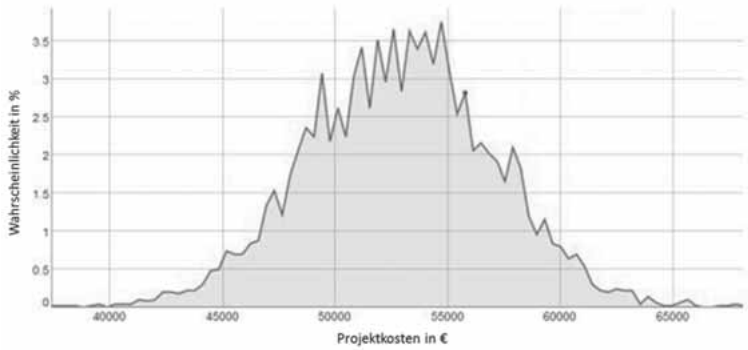


Abbildung 2: *Kostenverteilung eines Projektplans nach der Simulation*

Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine der verfügbaren Visualisierungen, aus der die Projektleitung erkennen kann, wie sich die einzeln modellierten Unsicherheiten in den Vorgängen auf den Projektplan insgesamt (hier konkret auf die realisierten Projektkosten) auswirken. Optional kann das ursprünglich geplante Projektbudget mit als Linie in das Diagramm integriert werden und ermöglicht somit eine schnelle Einschätzung des in dem Projektplan enthaltenen finanziellen Risikos.

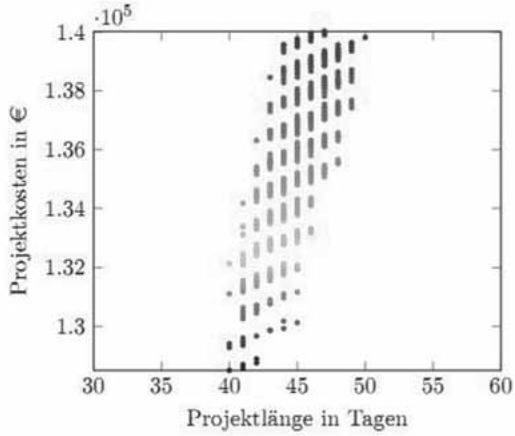


Abbildung 3: *Darstellung der Abhängigkeit von Projektlänge und Projektkosten*

Um zu erkennen, welche Kosten sich aus einer Verlängerung des Projektes ergeben, ist ein Streudiagramm in die Auswertung der Projektsimulation implementiert worden (vgl. Abb. 4). Hier wird für jedes Simulationsergebnis die Länge des Projektes sowie die damit verbundenen Kosten gegenübergestellt und in das Diagramm eingetragen. Durch die dabei entstehende Punktwolke können die monetären Auswirkungen einer Projektverlängerung abgeschätzt werden. Auch hier kann optional der ursprünglich eingeplante Punkt aus Projektkosten und -länge eingezeichnet werden. Weiterhin gibt das Diagramm Aufschluss über die Intensität der Abhängigkeiten (Steigung der Punktewolke) und erlaubt das schnelle Erkennen von Ausreißern oder Sprungkanten innerhalb des Ergebnisraums.

5 Fazit und Ausblick

Der vorgestellte Beitrag erläutert die Ziele, Anforderungen und ersten Ergebnisse des Forschungsvorhabens zur Entwicklung einer Methodik für ein simulationsgestütztes logistikintegriertes Projektmanagement im Anlagenbau. Das Vorhaben wird von Unternehmen des Anlagenbaus zur Energie-, Kraftwerk- und Umwelttechnik unterstützt, die sich nicht nur hinsichtlich ihrer Unternehmensgröße, sondern bedingt durch ihre Produkte (von Windkraftanlage über Biogasanlage bis zum Kraftwerk) auch hinsichtlich ihrer Projektstrukturen stark unterscheiden. Diese Vielfalt erfordert einen sehr breiten Ansatz bei der Anforderungsanalyse und Konzepterstellung, schafft aber über eine adaptierbare Lösung die Möglichkeit, methodenadditiv zu agieren. Die nächsten Schritte im Rahmen des bis 2015 laufenden Forschungsvorhabens sind die Formulierung von Nutzungsszenarien auf Basis des Vorgehensmodells zur logistikintegrierten Projektplanung, die Detailkonzeption der Methodik mit Adaption und Integration der bestehenden Methoden zum Projektmanagement, zur Logistiksimulation, zur Optimierung und zur 3D-Visualisierung des Baufortschritts, die technische Umsetzung der Architektur als Demonstrator sowie die Evaluation in den begleitenden Unternehmen.

Danksagung

Die in diesem Beitrag dargestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens der Universitäten Kassel und Paderborn. Das IGF-Vorhaben (17725 N) der Forschungsvereinigung BVL wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

Afinion: Homepage zum Afinion Project-Simulator: http://www.afinion.ch/afinion-de/Software/Project-Simulator; zuletzt zugegriffen am 16.02.2013.

Beißert, U.; König, M.; Bargstädt, H.-J.: Soft Constraint-based simulation of execution strategies in building engineering. In: Journal of Simulation (JOS) 4 (2010), S. 222-231 (doi:10.1057/jos.2010.8).

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Berlin: Springer, 2011.

Chahrour, R.: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Dissertation, Bauingenieurswesen, Universität Kassel, 2007.

DIN 69900: Projektmanagement – Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe. Berlin: Beuth.

DIN 69901-3 (2009): Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 3: Methoden. Berlin, Beuth, 2009.

Fraunhofer: Produkte des Fraunhofer-Institutes für Materialfluss und Logistik. http://www.iml.fraunhofer.de/de/themengebiete/supply_chain_engineering/produkte/; zuletzt zugegriffen am 16.02.2013.

Günthner, W. A.; Kraul, R.: Ablaufsimulation zur Planung von Bauprojekten am Beispiel eines U-Bahnhofs. In: Bargstädt, H.-J. (Hrsg.): Tag des Baubetriebs 2008, Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Nr. 17 (2008), Bauhaus-Universität Weimar, S. 5-9.

Günthner, W. A.; Bormann, A. (Hsrg.): Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen: Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

Hess, A.; Humm, B.; Voß, M.: Regeln für serviceorientierte Architekturen hoher Qualität. In: Informatik Spektrum, Band 29, Heft 6, Dezember 2006, S. 395-411.

Kugler, M.: CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau. Dissertation Bauingenieurwesen, Universität Kassel, 2012.

Kwak, Y.H.; Ingall, L.: Exploring Monte Carlo Simulation Applications for Project Management. Risk Management. doi:10.1057/palgrave.rm.8250017, 2007.

Majohr, M.; Rose, O.; Völker, M.: Simulationsbasierte Heuristik zur personalorientierten Steuerung komplexer Montagelinien. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2008, S. 387-396.

Mefisto: Homepage des im Rahmen des BMBF-Förderprogramms IKT 2020 geförderten Leitprojektes Mefisto. http://www.mefisto-bau.de; zuletzt zugegriffen am 16.02.2013.

ProModel: Homepage zum Projektsimulator auf Basis von ProModel: http://www.promodel.com/products/projectsimulator/management.asp; zuletzt zugegriffen am 28,07.2013.

Schmidt, T.; Rose, O.; Völker, M.; Carl, S.: Optimierte Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse. In: wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 4, S. 232-238.

SimCoMar: Homepage der internationalen Kooperationsgemeinschaft SimCoMar. http://www.simcomar.com/; zuletzt zugegriffen am 16.02.2013.

SIMoFit: Homepage zur Kooperationsvorhaben SIMoFit. http://www.simofit.com; zuletzt zugegriffen am 16.02.2013.

SIMULTRAIN: Homepage des Produktes: http://www.simultrain.com; zuletzt zugegriffen am 02.07.2013

Steinhauer, D.: Planung komplexer Montageabläufe mit Hilfe der constraintbasierten Simulation. In Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008, S. 81-89.

Steinhauer, D.: The Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) – 10 Years of Cooperative Development and Interbranch Applications. In: Proceedings of the 10th Euro-Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT), Berlin, 2011, S. 453-465.

Steinhauer, D.; König, M.; Bargstädt, H.-J.: Branchenübergreifende Kooperation zur Simulation von Montageabläufen beim Innenausbau von Schiffen. Hansa International Maritime Journal 9 (2007), S. 40-42.

TILOS: Homepage zu TILOS. www.tilos.org; zuletzt zugegriffen am 16.02.2013.

Völker, M.; Carl, S.; Rose, O.: Simulationsbasierte Personaleinsatzplanung für komplexe Montagesysteme. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 58 (2009), Nr. 1-2, S. 39-44.

Weber, J.: Simulation von Logistikprozessen auf Baustellen auf Basis von 3D-CAD-Daten. Dissertation, Maschinenbau, Universität Dortmund. 2007.

Wimmer, J.; Horenburg, T.; Günthner, W. A.: Erstellung einer Simulationsbibliothek für den Tiefbau. In: Bargstädt, H.-J. (Hrsg.): Tag des Baubetriebs 2010, Schriften der Professur Baubetrieb und Bauverfahren, Nr. 19 (2010), Bauhaus-Universität Weimar, S. 91-102.

Zülch, G.; Börkircher, M. Simulationsbasierte Analyse von Störungen im Baubetrieb. In Franz, V. (Hrsg.) 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft. Schriftenreihe Bauwirtschaft III/4. kassel university press GmbH, Kassel, 2007, S. 51.-68.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Modellierung und Simulation unscharfer baulogistischer Randbedingungen auf Basis der Fuzzy-Theorie

Modeling and simulation of uncertain construction logistics data using fuzzy set theory

Kamil Szczesny, Markus König, Ruhr-Universität Bochum, Bochum (Germany), kamil.szczesny@rub.de, koenig@inf.bi.rub.de

Lars Laußat, Manfred Helmus, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal (Germany), laussat@uni-wuppertal.de, helmus@uni-wuppertal.de

Abstract: In this paper a concept to model, integrate and assess uncertain real-time logistics data using discrete-event simulation is presented. The logistics data cover information about availability of resources and material delivery dates. These data implicitly imply different types of uncertainties due to infrequent data acquisition, varying transport times, or manual assumptions. In this paper the fuzzy set theory is applied to model these inherent uncertainties. Subsequently, the uncertain real-time logistics data are integrated into a discrete-event simulation model for assessing their consequences on the target schedule. Therefore, the alpha-cut sampling technique is used to generate discrete model input parameters. The simulation results can be used to modify the target construction schedule according to timeframes, costs and other business conditions. In order to demonstrate and validate the presented approach an elementary example is conducted.

1 Einleitung

Für eine effektive Ausführung und Steuerung von Hochbauprojekten sollten Bauablaufpläne konsistent und schnell an aktuelle Randbedingungen auf der Baustelle angepasst werden. Hierbei spielen baulogistische Informationen, wie beispielsweise aktuelle Liefertermine oder die Verfügbarkeit von Ressourcen, eine wesentliche Rolle. Jedoch ist die Bewertung von aktuellen baulogistischen Informationen bzgl. des geplanten Montageprozesses auf der Baustelle nicht trivial und ein überwiegend manueller, dadurch aufwendiger und fehleranfälliger Vorgang.

Die Verwendung ereignisdiskreter Simulationsmodelle zur Analyse und Planung von Bauprozessen ist eine akzeptierte Technik. Auf Basis von Simulationsmodellen können verschiedene Einflüsse auf den Bauablauf untersucht und bewertet werden. Hierzu müssen die entsprechenden Informationen in den aktuellen Bauablaufplan

bzw. das Simulationsmodell integriert werden, um anschließend Prognosen bzgl. der weiteren Ausführung abgeben zu können. Im Anschluss kann eine Modifikation des Bauablaufs erfolgen, falls die definierten Projektziele auf Grund der Einflüsse nicht mehr eingehalten werden können. Hierbei soll die ursprüngliche Struktur des Ablaufplans möglichst nur minimal verändert werden (vgl. van de Vonder et al. 2007).

Die Erfassung von aktuellen baulogistischen Kenndaten erfolgt heutzutage unter anderem auf Basis von Auto-ID-Techniken. Typische Auto-ID-Techniken sind beispielsweise RFID oder biometrische Verfahren. Diese Techniken können auf Baustellen sowie entlang der Transportwege zur Baustelle eingesetzt werden. Die Erfassung eines Betonfertigteils beim Verlassen des Fertigteilwerks ist eine typische baulogistische Information. Weitere Informationen zum Einsatz von RFID in der Baulogistik können Helmus et al. (2011) entnommen werden. Auf Basis von Auto-ID-Techniken kann jedoch nur bestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt sich eine bestimmte Ressource an einem bestimmten Ort befindet. Die aktuellen baulogistischen Informationen werden anschließend manuell für die betroffenen Produktionsprozesse aufbereitet. Dabei müssen inhärente Unsicherheiten berücksichtigt werden, die unter anderem durch unregelmäßige Datenerfassung oder variierende Transportzeiten zustande kommen können. Je größer die Zeitspanne zwischen Erfassung und zugehörigem Prozess oder je länger die Transportkette ist, desto größer kann die Unsicherheit sein. Zur Modellierung von mit Unsicherheiten behafteten Daten bieten sich beispielsweise probabilistische oder Fuzzy-basierte Methoden an.

In diesem Beitrag wird die Modellierung, Integration und Simulation von unsicheren baulogistischen Informationen im Rahmen der Bauablaufplanung unter Verwendung von Fuzzy-basierten Ansätzen vorgestellt. Die mittels Fuzzy-Mengen definierten baulogistischen Kenndaten werden in einen ereignisdiskreten Simulationsansatz integriert und systematisch analysiert. Dadurch wird es möglich, ihren Einfluss auf den Baufortschritt zu analysieren und zu bewerten. Die Anpassung des Bauablaufs infolge der baulogistischen Kenndaten ist nicht Gegenstand dieses Beitrags.

2 Stand der Forschung

In der stationären Fertigungsindustrie wird eine automatisierte Erfassung von Ist-Daten häufig schon vorgenommen. Dafür werden Maschinen sowie Material mit eindeutigen Identifikatoren versehen. Fixe Produktionslinien und detaillierte Produktionspläne, ermöglichen eine einfache Zuweisung von Ist-Kenndaten zu den dazugehörigen Prozessen. In Echtzeit erfasste Ist-Daten können schnell und präzise in Produktionspläne integriert werden, sodass diese stets aktuell gehalten werden (vgl. Hotz et al. 2006; Engelhardt-Nowitzki et al. 2008).

Im Gegensatz dazu, sind im Bereich des Bauwesens erst kürzlich verschiedene Konzepte bezüglich der Erfassung von Ist-Kenndaten mittels Auto-ID-Techniken, insbesondere mit RFID erarbeitet sowie in der Praxis umgesetzt worden. Zur Baustellen-Wareneingangskontrolle von Fertigteilen und Stahlkomponenten für den Brückenbau entwickelten Kim et al. (2009) ein RFID-basiertes Erfassungsportal. In Ren et al. (2011) wird ein RFID-basiertes Controlling-Instrument für den Wareneingang und den Einbau von Rohren vorgestellt. In Helmus et al. (2011) werden verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von Informationen zur Material- und Personallogistik und deren Verwaltung mit Hilfe eines RFID-Baulogistikleitstands

dargestellt und bzgl. ihres praktischen Einsatzes bewertet. Allerdings werden in diesen Ansätzen die erfassten baulogistischen Informationen nicht bzgl. des aktuellen Bauablaufplans unter Berücksichtigung von möglichen Unsicherheiten bewertet.

Im Bereich der ereignisdiskreten Simulation im Bauwesen existieren verschiedene bauspezifische Forschungsansätze (vgl. AbouRizk und Hague 2009). Hierbei wurden spezielle Simulationsmodelle für unterschiedliche Anwendungsgebiete aufgebaut und zur Analyse von Bauabläufen verwendet. Im Bereich des Tunnelbaus wurden auch schon Konzepte zur Integration von Fuzzy-basierten Expertensystemen für die ereignisdiskrete Simulation vorgestellt (vgl. Shaheen et al. 2009). Hierbei wurden jedoch ausschließlich diskrete Simulationsparameter mittels eines Fuzzy-basierten Inferenzmodells ermittelt. In Kulejewski (2011) wurde untersucht, wie Fuzzy-Mengen für unpräzise formulierte Randbedingungen verwendet werden können. Ein ähnlicher Ansatz wird auch im Rahmen dieses Beitrages unter Berücksichtigung von baulogistischen Informationen verfolgt. Ein Ansatz für Fuzzy-Mengen-basierte Modellierung von unsicheren Prozessdauern wird in Zhang et al. (2005) vorgestellt. Der Ansatz beschreibt, wie vage, unpräzise und subjektive Annahmen über Prozessdauern in Simulationsmodelle integriert werden können. Eine Berücksichtigung von Logistikprozessen und deren Auswirkung, insbesondere auf Ressourcenverfügbarkeit auf der Baustelle, findet keine Berücksichtigung.

In Vojdani und Rösner (2012) wurde ein auf Grey-Zahlen basierter Ansatz zur Modellierung von Unsicherheiten im Bereich der Leercontainerlogistik vorgeschlagen. Eine Grey-Zahl modelliert ein Intervall, über dessen Zahlenbereich keine Informationen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegen. Es wurde untersucht, wie dieses Konzepts für die mathematische Optimierung eingesetzt werden kann. Es wurde jedoch deutlich herausgestellt, dass zur Modellierung von unpräzisen Informationen sich eher Fuzzy-Mengen eignen.

3 Reaktive Bauablaufplanung auf Basis baulogistischer Ist-Kenndaten

Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes „Reaktive Bauablaufplanung auf Basis baulogistischer Ist-Kenndaten“ werden Konzepte zur automatisierten Aktualisierung und Anpassung von Bauablaufplänen im Hochbau unter Verwendung aktueller baulogistischer Randbedingungen erforscht. Im Fokus stehen hierbei Informationen über verfügbare und qualifizierte Ressourcen, die mittels des Einsatzes geeigneter Auto-ID-Techniken erfasst werden. Diese erfassten baulogistischen Informationen sollen systematisch und in Echtzeit aufbereitet und unter den vorherrschenden Unsicherheiten bewertet werden. Anschließend werden die aktuellen baulogistischen Kenndaten in den Bauablauf integriert, um mögliche Abweichungen von der Planung erkennen und bewerten zu können. Werden relevante Abweichungen von der Planung erkannt, soll die Bauablaufplanung gezielt angepasst werden. Der Soll-Ist-Vergleich und die anschließende Anpassung der Bauablaufplanung erfolgt mit Hilfe von Simulationsmodellen. Das Forschungskonzept zur reaktiven Bauablaufplanung auf Basis baulogistischer Ist-Kenndaten ist in Abbildung 1 dargestellt. Im Wesentlichen gliedert sich der Ansatz in vier Arbeitsschritte.

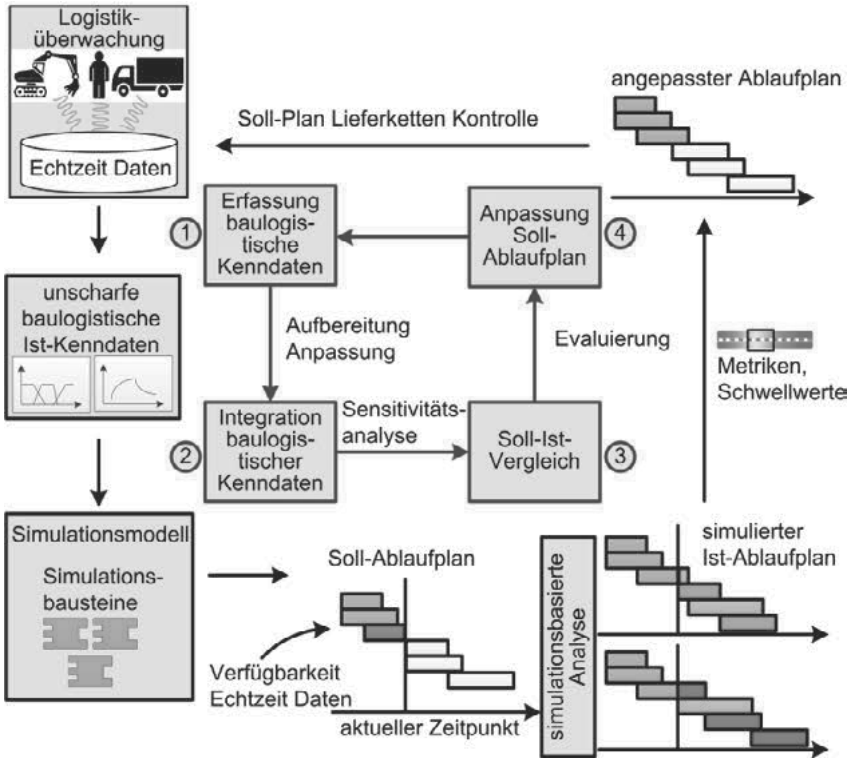


Abbildung 1: *Reaktive Bauablaufplanung auf Basis baulogistischer Ist-Kenndaten*

Im ersten Schritt werden aktuelle baulogistische Informationen mittels Auto-ID-Techniken automatisiert erfasst. Die erfassten Informationen können in der Regel nicht direkt den jeweiligen Bauprozessen zugeordnet werden. Daher werden zusätzlich manuell festgelegte Annahmen bzgl. Liefertermine oder dazugehöriger Unsicherheiten berücksichtigt. Erfasste und manuell ergänzte baulogistische Informationen führen zu sogenannten baulogistischen Ist-Kenndaten, die einzelnen Bauprozessen zugeordnet werden können. Im zweiten Schritt werden die aufbereiteten Ist-Kenndaten in ein existierendes Simulationsmodell integriert. Das hier verwendete Simulationsmodell basiert auf dem Konzept der Constraint-basierten Simulation (vgl. König et al. 2007). Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten bzw. unpräzisen Annahmen wird eine Vielzahl von Simulationsexperimenten durchgeführt, um eine Bewertung der Auswirkungen vornehmen zu können. Aktuell wird ausschließlich der Einfluss auf die Gesamtprojektdauer betrachtet. Hierzu werden Metriken entwickelt, um eine systematische Bewertung der simulationsbasierten Soll-Ist-Vergleiche vornehmen zu können (vgl. dritter Schritt in Abb. 1). Im vierten Schritt wird eine simulationsbasierte Anpassung des Bauablaufs vorgenommen, falls signifikante Abweichungen vom Soll-Ablaufplan festgestellt werden. Hierzu sind entsprechende Anpassungsstrategien zu entwickeln. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Modellierung und Integration der baulogistischen Kenndaten (vgl. zweiter Schritt in Abb. 1).

4 Modellierung unscharfer baulogistischer Ist-Kenndaten

Es existieren verschiedene Ansätze, um mit Unsicherheiten behaftete Daten zu modellieren. Häufig werden Konzepte der Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet, wenn sinnvolle Verteilungsfunktionen definiert werden können. Die Bestimmung geeigneter Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist nicht immer einfach, insbesondere wenn nicht auf umfangreiche statistische Daten zurückgegriffen werden kann. Die Integration von Verteilungen in Simulationsmodelle erfolgt hierbei im Wesentlichen unter Verwendung von Monte-Carlo-Methoden. Mit Hilfe von Zufallszahlen werden diskrete Eingangsparameter für die Simulationsexperimente bestimmt. Eine Vielzahl von Simulationsexperimenten wird durchgeführt und anschließend statistisch bewertet.

4.1 Fuzzy-Mengen und Alpha-Cuts

Liegen nur ungewisse sowie unpräzise Informationen vor, kann eine Fuzzy-Modellierung vorgenommen werden (vgl. Zadeh 1965). Gemäß der booleschen Mengentheorie, wird die Zugehörigkeit von Elementen zu einer Menge mit nur zwei Zuständen beschrieben. Ein Element ist Teil oder nicht Teil einer Menge. In der Fuzzy-Mengen Theorie wird die Logik der Zugehörigkeit erweitert, indem die Zuordnung von Elementen zu einer Menge auf Basis der sogenannten Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$ mit $\mu(x) \in [0,1]$ erfolgt. Eine Fuzzy-Menge X wird dann als eine Menge von Paaren $(x, \mu(x))$ mit $x \in \mathbb{R}$ beschrieben. Zum Beispiel bedeutet dies für ein x mit $\mu(x) = 0$, dass dieser Wert nicht zur Menge X gehört. Mit Hilfe von Fuzzy-Mengen lassen sich unscharfe Aussagen durch die Zuordnung von linguistischen Werten definieren. Beispielsweise kann die Aussage „Lieferung des Betonfertigteils erfolgt in ungefähr fünf Tagen“ mit Hilfe der Fuzzy-Menge in Abbildung 2 definiert werden. Hierbei wird die Aussage „ungefähr fünf Tage“ über eine Dreiecksfunktion mit den Werten drei, fünf und sieben Tagen beschrieben, wobei fünf Tage vollständige Zugehörigkeit bedeutet.

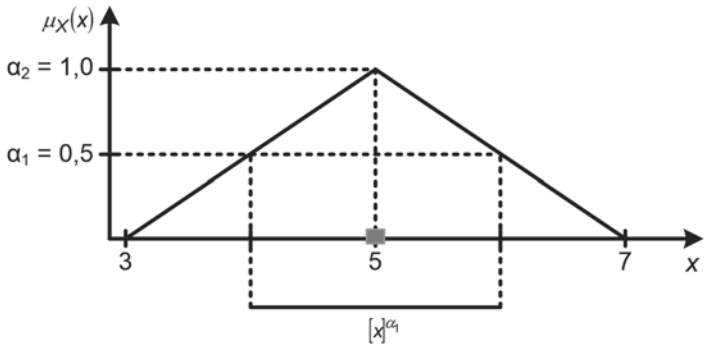


Abbildung 2: *Fuzzy-Menge der Aussage „Lieferung des Betonfertigteils erfolgt in ungefähr fünf Tagen“*

Zur Auswertung von Fuzzy-Mengen im Rahmen von ereignisdiskreten Simulationen müssen wiederum diskrete Werte erzeugt werden. In diesem Zusammenhang kann

die sogenannte Alpha-Cut-Methode verwendet werden. Ein Alpha-Cut kann als Grad der Sicherheit bzgl. der definierten Aussage interpretiert werden. Im Beispiel aus Abbildung 2 bedeutet ein Alpha-Cut bei 1,0, dass mit 100% Sicherheit die Lieferung in fünf Tagen erfolgt. Hingegen erfolgt die Lieferung zwischen vier und sechs Tagen bei einem Alpha-Cut von 0,5. Für eine vollständige Analyse der Fuzzy-Menge wird eine bestimmte Anzahl von Alpha-Cuts definiert. Je Alpha-Cut wird ein Intervall auf Basis des minimalen und maximalen x Wertes bestimmt. Anschließend erfolgt eine gleichverteilte Probennahme von Stützwerten aus diesem Intervall. Diese Stützwerte werden als diskrete Parameter im Rahmen der Simulation verwendet. Wie beim Monte-Carlo-Verfahren erfolgt im letzten Schritt eine statistische Auswertung der verschiedenen Simulationsexperimente. Abebe et al. (2000) und Hanss (2005) haben gezeigt, dass im Vergleich zur Monte-Carlo-Methode deutlich weniger Alpha-Cut-Methode Experimente durchgeführt werden müssen, um die gleiche Bewertungsqualität zu erreichen. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Alpha-Cuts ist, dass durch die Angabe eines Sicherheitsniveaus, subjektive Einschätzungen besser berücksichtigt werden können (vgl. Kulejewski 2011).

4.2 Fuzzy-basierte Lieferketten

Die Erfassung von Material und Ressourcen erfolgt im Bauwesen in der Regel recht unregelmäßig und nur zu bestimmten Zeitpunkten bzw. an bestimmten Erfassungsorten. Ein typisches Beispiel ist die Herstellung, Lieferung und Montage von Betonfertigteilen. Hier können Informationen bei Produktionsbeginn, bei Fertigstellung, beim Verlassen des Fertigteilwerks, unter anderem bei Zwischenlagerungen bzw. Zwischentransporten und bei Ankunft auf der Baustelle automatisch erfasst und zur Verfügung gestellt werden (s. Abb. 3).

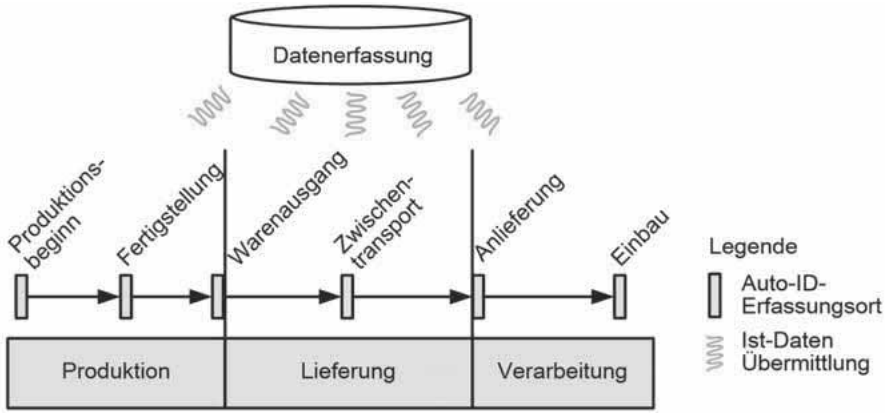


Abbildung 3: *Exemplarische Lieferkette für Betonfertigteile*

Die Zeitdauer zwischen den einzelnen Erfassungspunkten kann häufig nicht genau angegeben werden. Hier eignen sich insbesondere Fuzzy-basierte Angaben, die zusätzlich mit einem Sicherheitsniveau belegt werden können (vgl. Zhang et al. 2005). Zur Fuzzy-basierten Beschreibung von Zeitdauern zwischen zwei Erfassungszeitpunkten wurden linguistische Aussagen mit Fuzzy-Mengen definiert. Die unpräzisen Angaben umfassen die linguistischen Werte „ungefähr“ und „etwa

zwischen“. Es werden nur ganze bzw. halbe Tage angegeben, da eine detailliertere Planung im Bauwesen häufig nicht möglich ist. Für die Modellierung werden ausschließlich Dreiecks- oder Trapez-Fuzzy-Mengen verwendet. In Abbildung 4 sind zwei typische Fuzzy-Mengen dargestellt. Die Definition von geeigneten Fuzzy-Mengen ist äußerst wichtig. Hierbei sollte auf entsprechende Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Insbesondere bei großen Zeiträumen, wie beispielswiese „etwa zwischen 4 und 8 Wochen“, müssen die Extremwerte geeignet gewählt werden. Liegen aktuelle Erfassungsdaten am Anfang einer umfangreichen Lieferkette vor, müssen die Fuzzy-Mengen kombiniert werden.

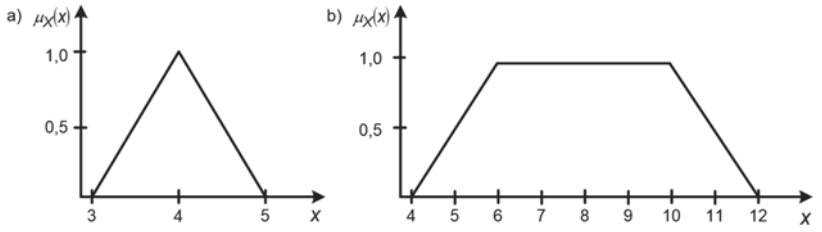


Abbildung 4: *Typische Fuzzy-Mengen für Zeitdauern: a) ungefähr vier Tage b) etwas zwischen 6 und 10 Tagen*

5 Simulationsbasierte Analyse baulogistischer Ist-Kenndaten

Im Rahmen der Analyse von aktuellen baulogistischen Ist-Kenndaten wird ein Constraint-basierter Simulationsansatz verwendet (vgl. König et al. 2007). Hierbei werden alle Randbedingungen bzw. Restriktionen der betrachteten Prozesse mit Hilfe von Hard und Soft Constraints modelliert. Als Hard Constraints können beispielsweise technologische Reihenfolgen, Sicherheitsbereiche, Liefertermine, notwendige Ressourcen und andere Restriktionen definiert werden, die zwingend erfüllt werden müssen. Im Gegensatz dazu können für bestimmte Prozesse auch sinnvolle bzw. zweckmäßige Randbedingungen, sogenannte Soft Constraints definiert werden. Soft Constraints müssen nicht vollständig erfüllt werden. Es handelt sich hierbei um ein allgemeines Constraint Satisfaction Problem (vgl. Rossi et al. 2006). Zur Generierung eines unter den Hard und Soft Constraints gültigen Bauablaufs wird die ereignisdiskrete Simulation verwendet. Bei jedem Ereignis werden alle noch nicht ausgeführten Prozesse in Hinblick auf ihre Hard und Soft Constraints geprüft und gegebenenfalls gestartet. Ein wesentlicher Vorteil dieses Konzepts ist, dass sehr einfach zusätzliche Bedingungen integriert werden können. Die Constraint-basierte Simulation wurde bereits erfolgreich in verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt und ist im Rahmen des Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) auf Basis des Simulationsframeworks Plant Simulation der Firma Siemens implementiert (vgl. Steinhauer und König 2010).

Für die Simulation der Auswirkungen von unscharfen baulogistischen Ist-Kenndaten werden unter Verwendung der Alpha-Cut-Methode diskrete Eingangswerte, wie beispielsweise konkrete Liefertermine, erzeugt (vgl. zweiter Schritt in Abb. 1). Diese zusätzlichen Randbedingungen werden als zusätzliche Hard Constraints für

die entsprechenden Produktionsprozesse abgelegt und somit in die Simulation integriert. Durch die Angabe eines Sicherheitsniveaus kann die Anzahl der notwendigen Simulationsexperimente sehr gut gesteuert werden, um statistisch signifikante Aussagen über die Auswirkungen der unscharfen baulogistischen Ist-Kenndaten zu erhalten. Zur Generierung und Kettung von Fuzzy-basierten baulogistischen Ist-Kenndaten und deren Analyse mit Hilfe von Alpha-Cuts wird ein entsprechender Datenbaustein implementiert. Des Weiteren wurden Softwarebausteine zur Auswertung der einzelnen Simulationsexperimente bzgl. der möglichen Auswirkungen einzelner Ist-Kenndaten auf die Produktionsprozesse umgesetzt.

6 Fallbeispiel

Zur Verifikation der Funktionsweise und Anwendbarkeit des Ansatzes zur Modellierung und Simulation unscharfer baulogistischer Randbedingungen auf Basis der Fuzzy-Theorie, wurden synthetische Bauprozesse für den Rohbau eines Bürogebäudes aufgestellt. Die Bauprozesse umfassen die Fertigung der Deckenplatten in Ortbeton sowie die Errichtung von Wänden und Stützen mittels Betonfertigteilen. Mit Hilfe eines Simulationsmodells wurde ein Soll-Baulaufplan erzeugt, welcher als Grundlage für den Soll-Ist-Vergleich im Rahmen der reaktiven Planung verwendet wird.

Zur Analyse von unscharfen baulogistischen Informationen wurden exemplarische Erfassungszeitpunkte definiert und deren Einflüsse auf die Bauprozesse mit Hilfe von Fuzzy-Mengen bewertet. Dabei wurden zwei verschiedene Arten von baulogistischen Informationen berücksichtigt. Zum einen wurde eine verspätete Fertigteillieferung von Stützenelementen (Variante 1) und zum anderen der Ausfall des Krans zum Transport der Fertigteile untersucht (Variante 2). Die dritte Variante umfasst die Kombination der beiden ersten Varianten. Zum Erfassungszeitpunkt t_0 liegen baulogistische Informationen vor. Die Lieferung, der in zwei Tagen erwarteten Betonfertigteile, verzögert sich um „etwa drei bis sechs Tage“ (Variante 1). Zum gleichen Erfassungszeitpunkt wird festgestellt, dass der für den Transport der Fertigteile benötige Kran für „etwa drei Tage“ ausfällt. Die Modellierung dieser unscharfen Aussagen erfolgt durch Dreieck- bzw. Trapez-Fuzzy-Mengen. Für die Bewertung der Auswirkungen wurden für die zwei Fuzzy-Mengen je zwei Alpha-Cut-Analysen mit den Werten $\alpha_1 = 0{,}3$ (30%) und $\alpha_2 = 0{,}8$ (80%) mit jeweils 100 Simulationsexperimenten durchgeführt. Die Anzahl der Experimente wurde durch empirische Stichproben ermittelt und gibt einen gerundeten Schwellwert an, ab welchem sich die Ergebnisse nur noch minimal ändern.

Die statistische Auswertung umfasst die resultierende Projektverzögerung infolge der verspäteten Lieferung sowie den Ausfall des Krans (s. Tab. 1). Für beide Alpha-Cuts fällt die durchschnittliche Projektverzögerung geringer aus, als die mittels Fuzzy-Mengen modellierte Annahme über die verspätete Lieferung bzw. den Kranausfall. Das liegt daran, dass vorhandene Zeitpuffer genutzt sowie andere Bauprozesse vorgezogen werden. Projektverzögerung der dritten Variante ist jeweils etwas größer. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass sowohl der Kran ausfällt, der von anderen Prozessen hätte genutzt werden können, als auch die Fertigteile nicht eingebaut werden können. Auf Basis dieser Analysen können nun geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden, falls die Auswirkungen als relevant eingestuft werden. Gegenmaßnahmen sind nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Tabelle 1: *Ergebnisse der untersuchten Varianten*

Variante	durchschnittliche Verzögerung (in Tagen)	Standardabweichung (in Tagen)
Variante 1 mit $\alpha_1 = 0{,}3$	1,60	0,48
Variante 2 mit $\alpha_1 = 0{,}3$	1,48	0,50
Variante 3 mit $\alpha_1 = 0{,}3$	1,89	0,31
Variante 1 mit $\alpha_2 = 0{,}8$	1,39	0,49
Variante 2 mit $\alpha_2 = 0{,}8$	1,29	0,45
Variante 3 mit $\alpha_2 = 0{,}8$	1,97	0,17

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde die Modellierung und Simulation unscharfer baulogistischer Randbedingungen auf Basis der Fuzzy-Theorie vorgestellt. Insbesondere im Bauwesen können sehr häufig keine diskreten Angaben bzgl. der Auswirkungen von aktuellen baulogistischen Informationen auf den Bauablauf spezifiziert werden. Dies ist zum einen den sehr langen Lieferketten und zum anderen den sehr sporadischen Erfassungen geschuldet. Daher ist die Analyse und Bewertung von aktuellen baulogistischen Informationen für die effiziente Ausführung der Bauprozesse essentiell. Mit Hilfe der Fuzzy-Theorie und dem Konzept der Alpha-Cut-Analyse können Auswirkungen auf einzelne Bauprozesse auf Grundlage von unpräzisen Informationen modelliert und untersucht werden. In diesem Beitrag wurden dazu ereignisdiskrete Simulationen auf Basis eines Constraint-basierten Ansatzes verwendet. Mit Hilfe der Alpha-Cut-Analyse werden diskrete Eingangswerte für die Simulation erzeugt. Anschließend können die Simulationsexperimente statistisch ausgewertet werden, um die Auswirkungen der aktuellen baulogistischen Informationen bewerten zu können.

Die zukünftigen Forschungsarbeiten werden sich zum einen mit der systematischen Aufbereitung von Lieferketten und möglichen Erfassungsstrategien im Bauwesen beschäftigen. Es sollen Strategien entwickelt werden, um mit möglichst wenigen Erfassungspunkten möglichst sichere Aussagen treffen zu können. Zum anderen werden unter Verwendung von simulationsgestützter Optimierung bauspezifische Verfahren zur Anpassung des Bauablaufs entwickelt, falls signifikante Abweichungen erkannt wurden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung dieser Arbeit im Rahmen des Forschungsprojektes „Reaktive Bauablaufplanung auf Basis baulogistischer Ist-Kenndaten“.

Literatur

AbouRizk, S; Hague, S.: An overview of the COSYE environment for construction simulation. In: Rossetti, M.D.; Hill, R.R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls,

R.G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Austin (USA), 13.-16. Dezember 2009, S. 2624-2634

Abebe, A.J.; Guinot, V.; Solomatine, D.P.: Fuzzy alpha-cut vs. Monte Carlo techniques in assessing uncertainty in model parameters. In: Proc. 4th International Conference on Hydroinformatics, Iowa City (USA), 23.-27. July 2000, ohne Seitenzahlen

Engelhardt-Nowitzki, C.; Nowitzki, O.; Krenn, B.: Management komplexer Materialflüsse mittels Simulationen. State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. 2008

Hanss, M.: Applied Fuzzy Arithmetic - An Introduction with Engineering Applications. Berlin: Springer 2005

Helmus, M.; Kelm, A.; Laußat, L.; Meins-Becker, A.: RFID-Baulogistikleitstand. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2011

Hotz, I.; Hanisch, A.; Schulze, T.: Simulations-based early warning systems as a practical approach for the automotive industry. In: Perrone, L. L.; Wieland, F. P.; Liu, J.; Nicol, D. M.; Fujimoto R. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey (USA), 3.-6. Dezember 2006, S. 1962-1970

Kim, C.; Ju, Y.; Kim, H.; Kim J.: Resource Management in Civil Construction Using RFID Technologies. In: 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Austin (USA), 24.-27. Juni 2009, S. 105-108

König, M.; Beißert, U.; Steinhauer, D.; Bargstädt, H.-J.: Constraint-Based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. In: Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation, Ljubljana (Slovenia), 9.-13. September 2007, ohne Seitenzahlen

Kulejewski, J.: Construction project scheduling with imprecisely defined Constraints. In: Wamelink, H.; Geraedts, R.; Volker, L. (Hrsg.): Proceedings of the CIB International Conference Management and Innovation for a Sustainable Built Environment, Delft (Niederlande), 20.-23. Juni 2011, keine Seitenzahlen

Ren, Z.; Anumba, C.; Tah, J.: RFID-facilitated construction materials management (RFID-CMM) - A case study of water-supply project. Advanced Engineering Informatics 25 (2011) 2, S. 198-207.

Rossi, F.; van Beek, P.; Walsh T.: Handbook of Constraint Programming. Amsterdam: Elsevier 2006

Shaheen, A. A.; Fayek, A. R.; AbouRizk, S. M.: Methodology for integrating fuzzy expert systems and discrete event simulation in construction engineering. Canadian Journal of Civil Engineering 36 (2009) 9, S. 1478-1490.

Steinhauer, D.; König, M.: Konzepte zum effektiven Aufbau von Simulationsmodellen für die Unikatproduktion. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 157-164

Vojdani, N.; Rösner, R.: Systematisierung, Bewertung und Modellierung der Unsicherheiten in der Leerconstainerlogistik. Logistics Journal (2012), keine Seitenzahlen

van de Vonder, S.; Ballestín, F.; Demeulemeester, E.; Herroelen, W.: Heuristic procedures for reactive project scheduling. Computers and Industrial Engineering, 52 (2007) 1, S. 11-28.

Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. Information and Control, 8 (1965) 3, S. 338-353.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Multiagentensimulation in komplexen Logistiksystemen am Beispiel der Baustellenlogistik

Multi-Agent-Simulation in complex logistics systems, especially in construction areas

Hubertus Franke, Hochschule Ostfalia, Salzgitter (Germany), hu.franke@ostfalia.de

Abstract: Multi Agent Systems (MAS) require a good environment description. Petri-Nets can be used to describe the complex environment of a MAS, because they can model both 'non-deterministic' and the asynchronous situations. In this way MAS could use the Petri-Net to make a decision in its complex environment. Moreover the behaviour of the MAS can also be described by Petri-Nets as well. To model the behaviour of MAS, Petri-Nets should be extended with new elements like special elements for "Agent Communication". A possible application for this model could be a decision-support-system in logistics, especially in construction sites realized with smartphones. Here smartphones could be Agents that control a logistics scenario, where the logistics environment is modelled by Petri-Nets. Here a prototype of a Multi-Agent-System based on a Petri-Net-Simulation-Tool called ©renew has been realized.

1 Einleitung

Multiagentensysteme in der Logistik sind ein denkbarer Ansatz, um einerseits die verschiedenen Objekte, Elemente und Prozesse auf einer (Groß-)Baustelle zu modellieren und andererseits, um die gestellten logistischen Aufgaben mittels dezentraler Interaktion der Agenten durch Agentenverhandlung zu lösen. In diesem Zusammenhang ist auch eine Kombination mit anderen Modellen denkbar und auch erstrebenswert, die auf Basis einer formalen, abstrakten Darstellung der Logistikzustände und Prozesse auf einer Baustelle den nötigen „Agentenlebensraum", d.h. die Agentenumwelt modellieren könnten. Petri-Netze stellen diesbezüglich ein geeignetes Instrument zur Verfügung, um einerseits alle Elemente und Beziehungen und anderseits alle Prozesse auf einer Baustelle zu beschreiben. Insbesondere der Sachverhalt, dass multivariante Entscheidungsmöglichkeiten zu demselben Gesamtziel führen können, bietet die Basis für eine Zusammenführung der beiden Modelle (Agenten und Petri-Netze): Agenten können die zu erwartenden nichtdeterministischen Entscheidungssituationen der Petri-Netze durch

Agentenverhandlung und anschließendem agentengesteuerten Schalten der jeweiligen Petri-Netz-Transitionen lösen! Im Folgenden soll eine mögliche Agentenverhandlung in einem Baustellenszenario über Petri-Netze modelliert und anschließend mit einer geeigneten Software zur Agentensimulation simuliert werden.

2 Grundlagen zur Multiagentensimulation in der Baustellenlogistik

Gemäß (Schenk et al. 2006) liegt eine besondere Herausforderung für eine dezentrale Logistiksteuerung im Bereich der Baustellenlogistik, da gerade hier viele unabhängige Akteure miteinander interagieren und ein übergeordnetes gesamtheitliches Ziel verfolgen. Komplexe Logistikbereiche betrachten einerseits die verschiedenen Ver- und Entsorgungsbereiche der Materialien bei variabler Erzeugnisstruktur und andererseits die Koordination der Ressourcen, Betriebsmittel und Mitarbeiter in einem sich kontinuierlich veränderlichen Zeitfenstern. Belegt wird dies u.a. durch ein Zitat von (Perdomo-Rivera et al. 2004, zitiert in Schenk et al. 2006), das besagt, dass 50% der Produktivitätsreduzierung auf Baustellen in den USA auf mangelnde Materialversorgung zurück zu führen ist. Dieser Beitrag soll daher, u.a. im Rahmen seiner Beispiele, einen dezentralen agentenbasierten Ansatz liefern, um eine Erhöhung der Produktivität in der Baustellenlogistik zu gewährleisten. Das hier beschriebene Modell soll anschließend in einem Multiagentenumfeld simuliert werden. Zur näheren Beschreibung der Baustellenlogistik wird auf die einschlägige Literatur verwiesen, wie z.B. (Clausen 2006 und Schenk et al. 2006).

2.1 Petri-Netze zur Logistikablaufsteuerung

Petri-Netze bedienen eine Modellierungstechnik, die sich seit Jahrzehnten für die Veranschaulichung von Systemen, insbesondere Logistiksystemen, etabliert hat. Durch Petri-Netze können Konstruktionen von Systemen, die informationstechnische Komponenten erhalten, modelliert werden (Baumgarten 1996). Strukturell bestehen Petri-Netze aus zwei Sorten von Elementen. Zum einen aus Stellen, die graphisch durch einen Kreis oder eine Ellipse dargestellt werden, zum anderen aus Transitionen, die als Quadrat oder Rechteck dargestellt werden *(Vgl. Reisig, W., 2010, S.22).* Diese Elemente werden durch gerichtete Kanten verbunden, welche graphisch durch einen Pfeil dargestellt werden. „Eine Kante modelliert niemals eine Systemkomponente, sondern immer eine abstrakte, manchmal nur gedankliche Beziehung zwischen Komponenten; beispielsweise logischer Zusammenhang“ *(vgl. Reisig, W., 2010, S.1-22).* Stellen können mit beliebig vielen Marken belegt sein, diese Markierung stellt den Zustand eines Systems dar. Die Dynamik eines Petri-Netzes entsteht durch das Schalten von Transitionen: Beim Schalten entnimmt die Transition die Markierungen aus einer Stelle und gibt sie an die nächste Stelle weiter. In der Regel können Transitionen nur dann schalten, wenn alle auf die Transition gerichteten Stellen mit mindestens einer Marke belegt sind. Für tiefere Informationen wird auf die grundlegende Literatur verwiesen, wie z.B. (Baumgarten 1996 und Leszak et. al. 1987).

2.2 Multiagentensysteme in der Logistik

Wenn (Software-)Agenten gemeinsam handeln, um eine Aufgabe oder ein Problem zu lösen, dann spricht man von Multi-Agenten-Systemen. (Klügel 2001, S. 17f.) *“An*

agent is an encapsulated computer system that is situated in some environment, and that is capable of flexible, autonomous action in that environment in order to meet its design objectives." (Jennings 1999, S. 2) Bei Agenten verfügt jeder einzelne Agent über ein spezifisches Fachwissen, das ihn u. U. zu einem Experten auf einem Gebiet macht. Andererseits verfügt er aber nur über ein begrenztes Wissen in Bezug auf seine Umwelt und über „seinen Bereich" hinausgehende Probleme. Somit ist ein Agent auf die „Mithilfe" bzw. Kooperation mit anderen Agenten angewiesen, um komplexe Probleme lösen zu können. Die Agenten sind Spezialisten. Jeder kann zur Lösung eines Problems einen Teil beitragen, aber nicht das ganze Problem allein lösen. Deshalb müssen die Agenten in irgendeiner Form kooperieren und zu diesem Zweck müssen sie miteinander kommunizieren. Der einzelne Agent löst im Rahmen eines Multi-Agenten-Systems den „Problemteil", über dessen Lösungsmöglichkeiten er verfügt. Somit kommt es, bezogen auf den einzelnen Agenten, zu einer lokalen Lösung eines Teilbereichs des Gesamtproblems, das dann mit Hilfe aller Teillösungen zu einer Gesamtlösung zusammengefasst wird. „*Typischerweise versuchen Multi-Agenten-Systeme ihre lokalen Problemlösungsplätze zu fusionieren und arbeiten dadurch gemeinsam auf ein selbstdefiniertes globales Ziel hin*." (Lüth 1998, S. 41f.).

3 Stand der Forschung im Bereich der agentenbasierten Planung und Steuerung

Die meisten Ansätze zur agentenbasierten Planung und Steuerung, insbesondere im Baustellenbereich, sind im umfangreichen Forschungsgebiet des Supply Chain Management zu finden. Dies basiert auf der Tatsache, dass gerade das Supply Chain Management viele Aspekte eines komplexen Baustellenszenarios „im Großen" darstellt. Die verschiedenen heterogenen Baustellenbereiche, die i.d.R. durch ökonomisch unabhängige Unternehmen dargestellt werden, sind hierbei synonym für die beteiligten Unternehmen in einer Supply Chain anzusehen. Auch gerade im Bereich der Baustellenlogistik gibt es ein übergeordnetes „Produkt" das die entsprechenden Vorgaben für alle beteiligten Baustelleneinheiten vorgibt, wie es auch i.d.R. im Supply Chain Management der Fall ist. Weitergehende Informationen hierzu sind insbesondere in (Clausen 2006) zu finden.

Im 2004 initiierten Sonderforschungsprojekt SFB 637 (Selbststeuerung logistischer Prozesse) ist federführend von der Universität Bremen die Wichtigkeit der Thematik dargestellt worden (Sonderforschungsbereich 637). Gerade in den A und B Projekten wird der Einsatz von Multiagentensystemen im Supply Chain Management tiefer untersucht. Das Fraunhofer IML in Dortmund untersucht in speziellen Arbeitsgruppen das Verhalten von Akteuren im Bereich der Baustellenlogistik und betrachtet neben dem Einsatz von Multiagentensystemen, insbesondere die Auswirkungen von Auto-Id-Technologien wie RFID und (mehrdimensionale) Barcodes (ten Hompel 2006). Derzeit arbeiten die Wissenschaftler zusammen mit Partnern aus der Wirtschaft an einem Versuchsaufbau eines Materialfluss-Systems, das ohne zentrale Steuerungsinstanz, mit Hilfe von intelligenten Behältern und mobilen Software-Agenten, autonom gesteuert wird (Fraunhofer IML 2004). Einen innovativen Beitrag zum Thema „RFID und Agententechnologie" gibt R. Zimmermann im DFG-Projekt „Tracking und Tracing der betrieblichen Leistungserstellung entlang der Wertschöpfungskette". Hier wird betrachtet, wie innerhalb von Supply Chains interorganisationale Informationsdefizite hinsichtlich der operativen Fortschritte und

Störungen in den Fulfillment-Prozessen bestehen. Die Folgen, in Form von hohen Kapitalkosten, überhöhten Lagerbeständen sowie langen Durchlaufzeiten, werden mit Hilfe eines agentenbasiertes Tracking- und Tracing-Konzepts behandelt, das die Überwachung von Aufträgen und deren Beziehungen über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglicht. Ziele sind hierbei die gezielten Verbesserungen der operativen Prozessabwicklung in Supply Chains (Zimmermann et. al. 20002). In (Franke 2004) wird der wechselseitige Einsatz von Multiagentensystemen zur Steuerung unternehmensübergreifender Logistiknetzwerke untersucht. Schwerpunkt der Forschungsarbeit hierbei ist das wechselseitige Verhalten von synchron und asynchron kommunizierenden Agenten. Asynchron versuchen Agenten (klassisch) eine initiale Lösung zu bekommen. Weiterhin synchronisieren sich die Agenten, um bestehenden Lösungen zeitweise zu verbessern. Zusammenfassend kann ergänzt werden, dass im Umfeld die Arbeiten in den Kasbah (Chavez et al. 1996), MARTIN (Hensel 1998), Planet-AS (Mannmeusel 1995), MAS-MARS (Fischer et al. 1995), TRAMPAS-Z (Falk 1995), PAMAS (Zimmermann et al. 2003), Dialog (Främling et al. 2003), PROVE (Szirbik 2002), CoagenS (Dangelmaier et al. 2004), DISPOWEB (Grolik et al. 2001), Macroscope (Windischbauer 2001), DASCh (van Parunak 1998) notwendige Vorüberlegungen im Bereich des agentenbasierten Verhaltens bzw. der agentenbasierten Simulation in Supply-Chains geliefert haben. Eine recht aktuelle Arbeit im Bereich der Multiagentensimulation im Baustellenbereich beschäftigt sich mit der Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation. Es werden hier ein Entwurf und eine prototypische Implementierung einer CAD-integrierten Simulationsmodellierungsumgebung für die Entwicklung agentenbasierter Simulationsmodelle im Hochbau durchgeführt. (Kugler 2012). In (Franke, Matteoschat 2009) werden Systeme untersucht, die für den Einsatz einer Agentensimulation geeignet wären. Eine konkrete Implementierung wird lediglich prototypisch angedeutet. Es sind somit keine weiteren Systeme bekannt, die eine agentenbasierte Simulation in komplexen Logistiksystemen auf Basis von Petri-Netzen konkret beschreiben.

Es soll daher ein konkreter Ansatz dargestellt werden, wie über Multiagentensimulation ein Baustellenszenario gesteuert werden kann. Hierbei soll eine Simulation über den Petri-Netz-Simulator ©renew der Uni-Hamburg (Kummer et. al. 2004) durchgeführt werden, wobei die Agenten selbst als Petri-Netze modelliert worden sind.

4 Konzept und Modellierung eines MAS für die Baustellenlogistik

Im Hinblick auf eine prototypische Realisierung einer Multi-Agentensimulation zur Planung und –steuerung in der Baustellenlogistik soll ein lückenloser Übergang von der Modellierung bis hin zur prototypischen Umsetzung dargestellt werden. In Abbildung 1 ist in diesem Zusammenhang ein Baustellen-Szenario beschrieben, das den Weg vom realen Szenario über die konzeptionelle Modellierung bis hin zur Darstellung der zur Umsetzung relevanten Technologien und Konzepte beschreibt.

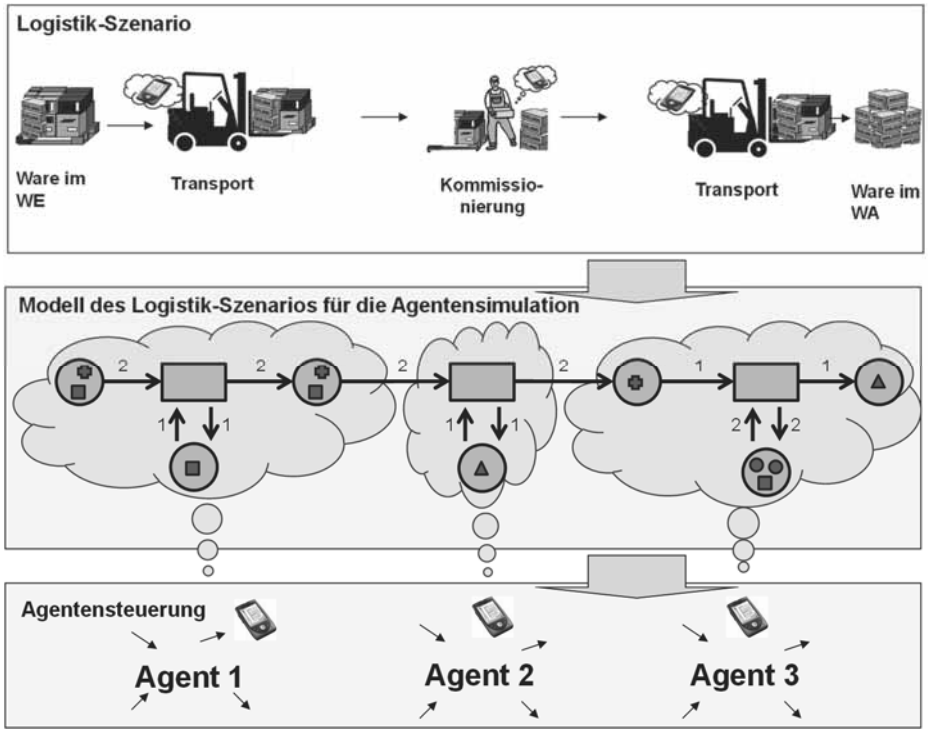


Abbildung 1: *RFID und PDAs (Personal Digital Assistent) bei der Agentenmodellierung*

Das Szenario beschreibt einen Materialfluss, der in einem Wareneingang eines Baustellenbereiches beginnt, einen Transport mittels Stapler zu einem weiteren Baubereich erfordert und nach einem Kommissioniervorgang die Ware in den Warenausgang transportiert. Entsprechend den Modellierungsvorgaben von Petri-Netzen können die „Zwischenzustände der Waren" als Stellen auf horizontaler Ebene mit den Transitionen und die benötigten Potenzialfaktoren wie Stapler, Kommissionierer und Montagemitarbeiter als Stellen unterhalb der jeweiligen Transitionen dargestellt werden. Die Prozesse „Transport" und „Kommissionieren" können in selbiger Reihenfolge den Transitionen des Petri-Netzes zugeordnet werden. Verschiedenartige Marken in den Stellen, die beispielhaft durch kleine Kreise, Dreiecke und Vierecke symbolisiert sind, sollen die Ausprägungen des Logistikszenarios darstellen, wie z.B. „Ware im Wareneingang", „Stapler für einen Transport zum Kommissionierbereich" und " Kommissionierer und Stapler mit Waren im Transport zum Warenausgang". Geht man davon aus, dass ein Agent jeweils einem Teilnetz eines Petri-Netzes zugeordnet ist und geht man weiterhin primär davon aus, dass insbesondere die Mitarbeiter im Baubereich über einen Agenten in Form eines PDA/Smartphones oder Laptops verfügen, so ist gemäß Abbildung 1 die angegebene Aufteilung eine mögliche Einteilung.

5 Umsetzung einer Multiagentensimulation

Im Folgenden soll die Umsetzung eines Multiagentensystems für die Baustellenlogistik mit Hilfe eines Petri-Netz-basierten Simulationstools modelliert und prototypisch realisiert werden. Es werden daher sowohl das fiktive Baustellenszenario als auch die Multiagentensimulation beschrieben und vorgestellt.

5.1 Beispielszenario einer Multiagentensimulation

Der im unteren Teil von Abbildung 1 vereinfacht dargestellte Kommunikationsablauf zwischen den Agenten soll nun konkreter dargestellt werden. Es wird daher in Abbildung 2 ein mögliches Szenario geschildert, wo in zwei Baubereichen zeitgleich eine Kommissionierung von Material stattfinden soll. Die Agenten der verschiedenen Kommissionierbereiche lösen dieses Problem über Agentenkommunikation, genau genommen in Form einer Agentenverhandlung. Dieser Sachverhalt wird mit Hilfe der Petri-Netz-Simulationssoftware ©renew dargestellt und implementiert. Um hierbei ein nichtdeterministisches Verhalten zu umgehen, bei dem nicht geklärt ist welcher Baubereich zuerst beliefert werden kann, verhandeln die jeweiligen Agenten die Zeiten um einen Transport der Ressourcen, d.h. der Agent des Staplers verhandelt mit den Agenten der Kommissionierbereiche A und B, wer zuerst eine Kommissionierung durchführen soll. Hierzu werden initial „Prioritäten“ abgefragt, die im System vereinfacht über Zahlenwerte dargestellt sind. Dies ist in den Stellen von „Jobliste Stapler A“ und „Jobliste Stapler B“ durch verschiedene Zahlenwerte dargestellt worden. Das nachfolgende Logistik-Szenario ist zwar aufgrund seiner exemplarischen Darstellung recht einfach gehalten, beschreibt aber die Grundstruktur für die Erstellung komplexer Szenarien auf Basis von Petri-Netzen und Agenten. Der Baubereich ist als Beispiel gewählt worden, da gerade hier viele heterogene Logistikbereiche aufeinander treffen.

5.2 Agentensimulation mit ©renew

Nachdem ein Beispielbereich einer Baustellenlogistik durch ein Petri-Netz beschrieben wurde, soll dieser mit Hilfe entsprechender Tools simuliert werden.

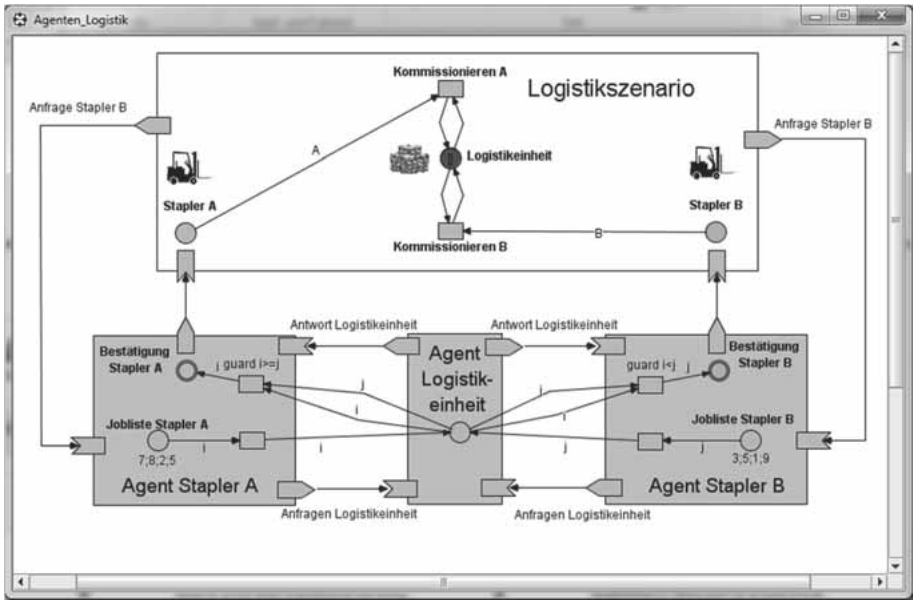


Abbildung 2: *Agentensimulation mit ©renew*

In Abbildung 2 ist im oberen Bereich das reale Logistikszenario beschrieben, bei dem eine Logistikeinheit, z.B. eine Palette, von zwei verschiedenen Staplern kommissioniert werden kann. Betrachtet man ausschließlich diesen Petri-Netz-Bereich, so ist es nicht definiert, welcher der beiden Stapler dies durchführen kann, wenn hypothetisch sowohl die Stellen für „Stapler A“ als auch für „Stapler B“ eine steuernde Marken haben.

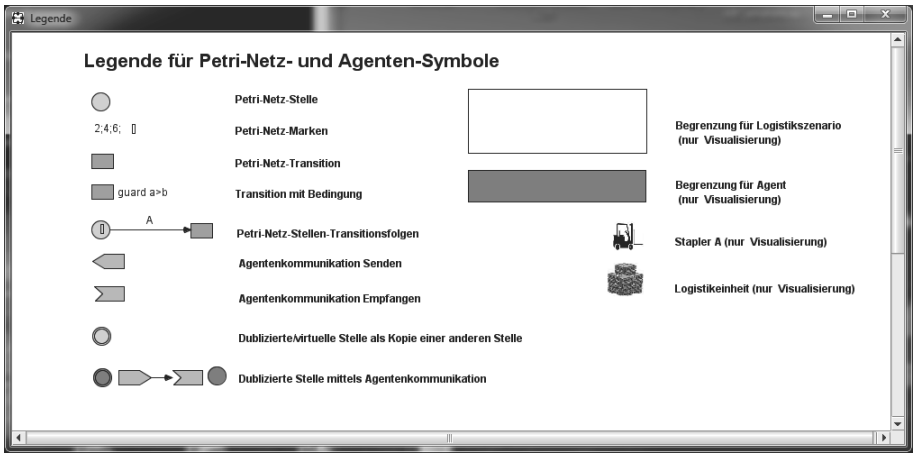


Abbildung 3: *Legende zu Abbildung 2*

Die Entscheidung dazu wird mit Hilfe der im unteren Teil der Abbildung 2 beschrieben Agenten gelöst, indem initial beide „Stapler-Stellen“ keine steuernde

Marke haben. Hier ist jeweils ein Agent für jede Stelle im oberen ‚Teil' des Petri-Netzes verantwortlich. So verhandeln die Agenten für „Stapler A" und „Stapler B" mit dem Agenten für die Logistikeinheit, wer von beiden die Kommissionierung durchführen soll. Zur Vereinfachung ist diese Verhandlung ebenfalls über Petri-Netze beschrieben. Zur Visualisierung sind hierbei, zusätzlich zu den üblichen Petri-Netz-Symbolen, noch Symbole für Agentenkommunikation und Agentenabgrenzung dargestellt worden. Die konkrete Legende dazu ist in Abbildung 3 ersichtlich. Insbesondere die Petri-Netz-Komponenten zur Agentenkommunikation werden in (Ferber 1999) beschrieben und untersucht. So ist beispielsweise in Abbildung 2 in „Jobliste Stapler A" die Prioritätenmenge {7;8;2;5 } und in „Jobliste Stapler B" die Prioritätenmenge {3;5;1;8} dargestellt. Da es sich um Mengen handelt, werden zufällig zwei Prioritäteneinträge miteinander verglichen und in der zugehörigen Transition über einen Größenvergleich weitergeleitet. Dies erfolgt über die Anweisung „guard i>=j" oder entsprechend über „guard j>i". Im Fall von i>=j wird eine Steuermarke in die Stelle für „Bestätigung Stapler A" transferiert, so dass im Logistikszenario Stapler A die Kommissionierung durchführen kann. Analog ist ein Verhalten für Stapler B implementiert.

6 Zusammenfassung

Gerade die Baustellenlogistik stellt besonders hohe Anforderungen an die Qualität ihrer logistischen Prozesse, da u.a. eine Sicherstellung einer kontinuierlichen Materialverfügbarkeit das Zusammenspiel sowohl technischer als auch Software-basierter Komponenten erfordert. Es ist eine kontinuierliche Steuerung und Überwachung der Prozesse und Abläufe von Wichtigkeit, damit u.a. jederzeit der aktuelle Projektstatus ermittelt werden kann. Aufgrund einer steigenden Komplexität und wirtschaftlicher Interessen der beteiligten Akteure im Baubereich ist ein zentrales Server-Konzept, bei dem alle relevanten Daten auf einem zentralen Rechner gespeichert werden, nur bedingt geeignet. Vielmehr ist im Rahmen dieser Ausarbeitung ein dezentrales Konzept vorgestellt worden, bei dem den relevanten Akteuren im Baustellenbereich (Software-)Agenten zur Entscheidungsunterstützung und Planung bzw. Steuerung der Materialflussprozesse zur Verfügung gestellt werden. Die Agenten, die in ihrer Gesamtheit ein MAS bilden, haben sowohl eigenes lokales Fachwissen, als auch ein Bild ihrer Umwelt und ein Datenmodell der aktuellen Systemzustände. Dieses Bild der Umwelt ist mit Hilfe von verteilten Petri-Netzen dargestellt worden, die im Falle eines Nichtdeterminismus durch die jeweils verantwortlichen Agenten gesteuert werden können. Es ist ausschnittweise gezeigt worden, wie mit Hilfe einer Multiagentensimulation auf Basis von Petri-Netzen ein komplexer Materialfluss im Baubereich gesteuert werden kann. Weiterhin ist erklärt worden, wie eine Agentensimulation im Vorfeld einer Agentenimplementierung auf PDAs der Akteure, die beschriebenen Modelle ausreichend validiert.

7 Ausblick

Aktuell wird die oben beschrieben Agentensimulation über ein reales Multiagentensystem auf Basis einer PDA/Smartphone-Kommunikation implementiert und befindet sich in einem fortgeschrittenen Stadium. Hierbei ist jeweils ein PDA (bzw. Smartphone) ein Agent und für einen gewissen Teil eines komplexen Baustellenszenarios verantwortlich, der jeweils Teilausschnitt eines

komplexen (zentralen) Petri-Netzes ist. Aufgabe der Agenten ist es, die nichtdeterministischen Situationen im Petri-Netz zu verhandeln. Impulse und Prioritäten zur Entscheidungsfindung der Agent werden manuell vom jeweiligen Bereichsleiter des Baustellenszenarios in den Agenten eingegeben. Die aktuelle Entwicklung erfolgt in Form einer „App“ auf Android-basierten Smartphones zur dezentralen Steuerung eines Baustellenszenarios.

Literatur

Baumgarten, B.: Petri-Netze - Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl. Heidelberg [u.a.]: Spektrum Akad. 1996.

Chavez, A.; Maes, P.: Kasbah: An Agent Marketplace for Buying and Selling Goods. In Cabtree, B.; Jennings, N (Eds.): Proc. of the First International Conference on the Practical Application of Intelligent Agent and Multi-Agent-Technology (PAAM ’98). The Principal Agent Company Ltd: Blackpool, 1996, S. 75-90

Clausen, U. (Hrsg.): Baulogistik - Konzept für eine bessere Ver- und Entsorgung im Bauwesen, Auflage: 1: Praxiswissen 2006

Dangelmaier, W.; Gajewski, T.; Pape, U.; Rüther, M.: Supply Chain Chain Management: Grundlagen, Konzepte, Anwendungen, Deutscher Universitätsverlag: Wiesbaden 2004.

Falk, J.: Ein Multi-Agentensystem zur Transportplanung und –steuerung bei Speditionen mit Trampverkehr, Universität, Fachbereich Wirtschaftsinformatik, Dissertation 1995

Ferber, J.: Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence, Harlow: Addison Wesley Longman1999

Fischer, K.; Müller J. P.; Pischel, M.; Schier, D.: A Model for Cooperation Transportation Scheduling. In: Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent-Systems (ICMAS 95). San Francisco, 1995, S. 109-116

Främling, K.; Holmström, J.; Ala-Risku, T.; Kärkkäinen, M.: Product Agents for Handling Information about Physical Objects; Research Report, Helsinki University of Technology 2003

Franke, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Universität Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2004

Franke, H.; Matteoschat, S.: Dezentrale Produktionsablaufplanung mittels Agentensimulation: 11. Paderborner Frühjahrstagung - Nachhaltigkeit in flexiblen Produktions- und Liefernetzwerken, 04/2009

Fraunhofer IML: Materialfluss-Systeme mit künstlicher Intelligenz steuern, LOGISTIK für Unternehmen, Ausgabe 10/2004, S. 28

Grolik, S.; Stockheim, T.; Wendt,O.; Albayrak, S.; Fricke, S.: Dispositive Supply Web-Koordination durch Multiagentensysteme. In: Wirtschaftsinformatik 2, 2001, S.143-155

Henseler, H.: Aktive Ablaufplanung mit Multi-Agenten, Vol 180. Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz, Akademische Verlagsgesellschaft: Berlin 1998

Jennings, N. R.: Agent-Oriented Software Engineering, Proc. 12th Int Conf on Industrial and Engineering Applications of AI, Cairo, Egypt, 4-10. (Invited paper) [Also appearing in Proc. 9th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW-99), Valencia, Spain 1-7 (Invited paper)]

Klügl, F.: Multiagentensimulation – Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen. München: Addison-Wesley 2001.

Kugler, M.: „Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation“, Schriftenreihe Bauwirtschaft, Institut für Bauwirtschaft IBW, Uni Kasssel 2012

Kummer, O.; Wienberg, F.; Duvigneau, M.; Schumacher, J.; Köhler, M.; Moldt, D.; Rölke, H.; Valk, R.: An extensible editor and simulation engine for Petri nets: Renew. In Jordi Cortadella and Wolfgang Reisig, editors, Applications and Theory of Petri Nets 2004. 25th International Conference, ICATPN 2004, Bologna, Italy, June 2004. Proceedings, volume 3099 of Lecture Notes in Computer Science, pages 484-493, Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2004.

Leszak, M.; Eggert, H.: Petri-Netz-Methoden und –Werkzeuge – Hilfsmittel zur Entwurfsspezifikation u. -validation von Rechensystemen, Berlin [u.a.]: Springer 1989

Lüth, T.: Technische Multi-Agenten-Systeme – Verteilte autonome Roboter- und Fertigungssysteme. München [u.a.]: Carl Hanser 1998.

Mannmeusel, T.: Ein verteilter Ansatz zur operativen Produktionsplanung auf der Basis eines Multiagenten-Systems. In: Klauck, C.; Müller, J. (Hrsg.): Künstliche Intelligenz und verteilte PPS-Systeme; Bericht Nr. 5/95, Universität Bremen 1995.

Perdomo-Rivera, J.: A framework for a Decision Support Model for Supply Chain Management in the Construction Industry. - Blacksburg, Virginia, 2004, zitiert in (Schenk et al. 2006).

Reisig, W.: Petrinetze, Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien, 1. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Taubner 2010

Schenk, M.; Plate, C.; Richter, K.; Linke, D.: Logistische Prozesssicherheit auf industriellen Baustellen - Einsatz von Radio Frequenz-Technologien und Telematik zur Produktivitätsverbesserung im Anlagenbau, Tagungsband, 12. Magdeburger Logistiktagung, 16.09.2006

Sonderforschungsbereich 637: Selbststeuerung logistischer Prozesse, Universität Bremen 2004

Szirbik, N.: A Negotiation Enabling Agent Based Infrastructure: Composition and Behavior. In: Information Systems Frontier, Volume 4, Issue 1. 2002 S. 85-99

ten Hompel, M.: Die Marktstudie »RFID 2004 Logistiktrends für Industrie und Handel«: Praxiswissen 2006

van Parunak, H.; VanderBok, R. S.: Modeling the Extended Supply Network, Working paper, Industrial Technology Institute, Ann Arbor, USA, 1998.

Windischbauer, T.: Kollaborative Supply-Chain-Execution in heterarisch koordinierten Logistiknetzwerken auf Basis von mobilen Agentensystemen. Linz, 2001

Zimmermann, R.; Butscher R.: Agentenbasierte Auftragsüberwachung in Supply-Chains, in: Arbeitspapier Wirtschaftsinformatik II Nr. 04/2002, Universität Erlangen-Nürnberg [Hrsg.], Nürnberg, 2002

Zimmermann, R.; Paschke, A.: PAMAS – an Agent-based Supply Chain Event Management System. In: Proc. Of Americas Conf. on Information Systems 2003.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Ein simulationsbasiertes Assistenzsystem zur Pflege von Dispositionsparametern eines ERP-Systems im laufenden Betrieb

A simulation-based decision support system to update material planning parameters of an ERP-System in real-time

Ulrike Stumvoll, Hochschule Regensburg, Regensburg (Germany), ulrike.stumvoll@extern.hs-regensburg.de
Uwe Nehls, Jade Hochschule, Wilhelmshaven (Germany), uwe.nehls@jade-hs.de
Thorsten Claus, TU Dresden / IHI Zittau, Dresden (Germany), claus@ihi-zittau.de

Abstract: In an Enterprise Resource Planning (ERP) System production planning is influenced by a variety of parameters. Previous investigations have shown that the setting of the parameters is of high relevance. The setting should be checked and adjusted, e. g. after a change of environmental factors. This is done by material planners. In practice it is difficult due to a large number of parameters, materials and other reasons. In this paper, a simulation-based system to update material planning parameters in real-time is proposed. The system supports planners in deciding whether and how the material parameters need to be adjusted. The impact of these changes to pre-set targets is determined by simulation.

1 Einführung in die Thematik der Pflege von Dispositionsparametern eines ERP-Systems

Module zur Materialbedarfsplanung und Disposition sind wichtige Bestandteile von Produktionsplanung und -steuerungssystemen (PPS) innerhalb von Enterprise Ressource Planning (ERP) Systemen. Mit Hilfe einer Vielzahl von Datenfeldern können die Algorithmen an die spezifischen Gegebenheiten in einem Unternehmen angepasst werden. Geht von dem Datenfeldeintrag eine substanzielle Wirkung auf das Verhalten des Systems aus und kann dadurch der planerische Willen des Anwenders umgesetzt werden, so wird das Datenfeld als Parameter bezeichnet (Hau 2001). Dies ist der Fall z. B. bei der Dispositionsart, der Losgrößenheuristik und den Losgrößenmodifikatoren, welche die Materialbedarfsplanung beeinflussen. Der Ablauf der Produktionsplanung und -steuerung sowie die Funktionsweise der genannten Parameter werden u. a. in Herrmann (2011) bzw. Tempelmeier (2006) beschrieben.

Die korrekte Einstellung der Dispositionsparameter eines ERP-Systems hat gravierende Auswirkungen auf die Kennzahlen Terminabweichung, Kapitalbindung und Durchsatz. Dies zeigen die mit Hilfe von Simulation durchgeführten Untersuchungen von Dittrich et al. (2009).

Die Pflege der Dispositionsparameter eines ERP-Systems stellt für Disponenten eine Herausforderung dar, wie Kapitel 2 zeigt. In Abschnitt 3 werden die Ergebnisse bestehender Analysen zur Wirkung von Planungsverfahren und -parametern sowie Ansätze zur Ermittlung besserer Parametereinstellungskombinationen beschrieben. Ein simulationsbasiertes Assistenzsystem zur Unterstützung von Disponenten bei der Pflege von Parametern eines ERP-Systems im laufenden Betrieb wird in Kapitel 4 vorgestellt. Durch dieses System wird dem Benutzer anhand einer Ampelgrafik angezeigt, ob ein Handlungsbedarf bei der Pflege der Parameter besteht. Bedarf liegt vor, wenn durch eine andere Parametereinstellung ein höherer Zielerreichungsgrad für zukünftige Perioden erzielt werden kann. Zudem wird der alternative Parametereinstellungsvorschlag ausgegeben. In Kapitel 5 wird aufgezeigt, welche Verbesserungen sich für Disponenten durch dieses simulationsbasierte Assistenzsystem ergeben. Eine Bewertung und ein Ausblick werden im abschließenden Abschnitt 6 dieses Beitrags gegeben.

2 Herausforderungen für Disponenten

Bei der Einstellung der Dispositionsparameter wird zwischen der Parameterinitial-einstellung bei Inbetriebnahme eines ERP-Systems und der Parameterpflege im laufenden Betrieb unterschieden. Die Parameter sind im laufenden Betrieb nach jeder Änderung der Umweltfaktoren oder Veränderung des Produktionssystems bzw. mindestens jährlich zu prüfen und ggfs. anzupassen (Jodlbauer 2008). Beispiele, die Anpassungen erforderlich machen können, sind Absatzschwankungen oder die Erhöhung einer Maschinenverfügbarkeit. In der Praxis ist es für einen Disponenten schwierig, den Zeitpunkt zu dem eine Pflege der Parameter erforderlich ist, für jedes eigengefertigte und fremdbezogene Material zu erkennen. In der Industrie ist es üblich, dass ein Disponent für mehr als 500 Artikel verantwortlich ist (Gulyássy et al. 2009).

Kommt ein Disponent zu dem Schluss, dass die Parametereinstellung eines Materials angepasst werden muss, so ist eine geeignete Einstellungskombination zu ermitteln. Dabei ist die Auswirkung der Änderung auf die definierte Zielsituation eines Unternehmens zu berücksichtigen. Einerseits wird die Wahl einer geeigneten Einstellung durch die Vielzahl der Stellgrößen erschwert. Die Produktionsplanungs-komponente des SAP-Systems hat etwa 40 Parameter, die an einen einzelnen Artikel gebunden sind (Dittrich et al. 2009). Andererseits wird sie aber auch dadurch erschwert, dass nichtlineare Effekte, positive Verbund- und schädliche Nebenwir-kungen zwischen den einzelnen Parametern auftreten können (Mertens et al. 1991).

Aufgrund der genannten Herausforderungen werden in vielen Unternehmen die Parameter, nachdem sie einmal eingestellt wurden, meist nicht mehr angepasst, obwohl die Einstellung der Parameter von hoher wirtschaftlicher Relevanz ist. Damit eine Pflege im laufenden Betrieb erfolgt, ist eine Entscheidungsunterstützung wünschenswert, welche einem Disponenten anzeigt, wann, bei welchem Material und wie die Parameter im Hinblick auf eine Verbesserung der Zielsituation anzupassen sind.

3 Bestehende Analysen zur Wirkung von Planungsparametern und Ansätze zur Ermittlung besserer Parametereinstellungskombinationen

Die Wirkung von Planungsverfahren und -parametern wurde in der Literatur bereits analysiert. Unter dem Begriff „Fehlerkreis der Produktionssteuerung“ ist zum Beispiel das Phänomen bekannt, dass die Disposition einer schlechten Termintreue mit einer Erhöhung der Vorlaufzeit entgegen wirken möchte. Jedoch dadurch genau das Gegenteil eintritt, nämlich eine weitere Verschlechterung der Termintreue (Plossl 1973).

Leistungsvergleiche zwischen verschiedenen Losgrößenheuristiken im Hinblick auf die Gesamtkosten wurden von mehreren Autoren durchgeführt. Die Untersuchungen von Wemmerlöv (1981) und Wemmerlöv (1982) zeigten zum Beispiel, dass die Gesamtkosten bei Anwendung des Groff- und des Silver-Meal-Verfahrens im Mittel nur um etwa 1 % über den mit einem optimalen Verfahren verursachten Kosten für Bedarfsfolgen mit einem festen Planungshorizont lagen. Die Versuchsreihen von Hermann und Stumvoll (2010) zeigten eine deutliche Überlegenheit des Groff- gegenüber dem Silver-Meal-Verfahren.

Diese und weitere Wirkungsanalysen, welche teilweise unter Verwendung von Simulation vorgenommen wurden, führten zu allgemeinen Einstellungshinweisen für Dispositionsparameter. Diese sind u.a. Bestandteil von Herrmann (2011) und Dittrich et al. (2009).

In der Literatur wurden auch Ansätze zur Ermittlung besserer Parametereinstellungskombinationen vorgestellt. Ein wissensbasiertes Verfahren wurde zum Beispiel von Wedel (1990) und Hartinger (1995) entwickelt. Der Ansatz, dass PPS-Systeme selbst günstigere Parametereinstellungen mit Hilfe eines genetischen Algorithmus und einer Proberechnung ermitteln, wurde von Kernler (1994) vorgestellt. Jedoch berücksichtigen diese Ansätze nur unzureichend wie einem Disponenten auf eine effektive und angemessene Art und Weise angezeigt werden kann, ob und wie die Parameter zu pflegen sind. Die Anforderungen eines Disponenten an die Ergebnisvisualisierung kennen die Autoren aus eigenen Erfahrungen in der Disposition.

Im ERP-Markt hat die SAP AG den größten Marktanteil (Schaffry 2012). Das SAP-System bietet allerdings keine Unterstützung bei der Parameteroptimierung im laufenden Betrieb. Es sind nur rudimentäre Hilfsmittel vorhanden, wie zum Beispiel die ABC-Analyse, welche ein Ordnungsverfahren zur Klassifizierung großer Datenmengen ist, oder die Bodensatzanalyse, über die Materialien des Lagerbestands identifiziert werden können, die über einen bestimmten Zeitraum, nicht bewegt wurden (Gulyássy et al. 2009).

Für eine Vielzahl von Problemstellungen sind bereits Unterstützungssysteme vorgestellt worden, welche Handlungsalternativen für den Entscheider vorschlagen. Systeme dieser Art werden als Assistenzsysteme bezeichnet, wenn die automatische Ausführung einer Alternative eine Bestätigung durch den Anwender erfordert (Hauß und Timpe 2002). Wird innerhalb des Systems die Simulation eingesetzt, so wird von einem simulationsbasierten Assistenzsystem gesprochen. Im folgenden Kapitel wird ein simulationsbasiertes Assistenzsystem zur Pflege der Parameter eines ERP-Systems im laufenden Betrieb vorgestellt.

4 Ein simulationsbasiertes Assistenzsystem zur Entscheidungsunterstützung bei der Pflege von Parametern im laufenden Betrieb

Bevor auf den Ablauf des simulationsbasierten Assistenzsystems eingegangen wird, wird das Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung und Möglichkeiten zum Umgang mit mehreren Zielfunktionen beschrieben. Dies ist erforderlich, da eine Bewertung der verschiedenen Handlungsalternativen, im Hinblick auf ihren Beitrag zur Erreichung der Ziele, die Grundlage für das Treffen einer Entscheidung ist. Es sei erwähnt, dass unter einer Entscheidung die rationale Auswahlhandlung aus mindestens zwei Alternativen verstanden wird (König et al. 2003). Nachdem die einzelnen Schritte des Verfahrens im Detail erläutert wurden, wird darauf eingegangen, zu welchen Zeitpunkten das simulationsbasierte Assistenzsystem ausgeführt werden soll.

Das vorgestellte Assistenzsystem ist für die Pflege der Parameter der programmorientierten Materialbedarfs- und Losgrößenrechnung von eigengefertigtem Material konzipiert worden. Es ist grundsätzlich für eine Vielzahl von Unternehmen, welche bestimmte Restriktionen (z. B. Werkstattfertigung) erfüllen, anwendbar.

4.1 Zielsystem

Die Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung ist es, die logistischen und wirtschaftlichen Ziele in immer höherem Maße zu erreichen, wobei die gegenseitigen Abhängigkeiten zu berücksichtigen sind. Aus der Anforderung nach hoher Termintreue und kurzer Lieferzeit (Durchlaufzeit) durch den Kunden und dem Bestreben eines Unternehmens nach niedrigen Beständen und einer hohen Maschinenauslastung resultiert ein interner Zielkonflikt. Dieser wird in der Literatur als „Dilemma der Produktionssteuerung“ bezeichnet (Wiendahl 2008). Im simulationsbasierten Assistenzsystem zur Unterstützung bei der Pflege von Parametern werden anstelle hoher Termintreue und hoher Auslastung die Zielgrößen geringe Verspätung und niedrige freie Kapazität verwendet. Hierdurch liegen lediglich Minimierungsprobleme vor. Dies ist für die Ergebnisanzeige erforderlich und erleichtert u. a. die Entwicklung des Prototyps des Systems.

Aufgrund des Vorliegens eines Zielkonflikts gibt es keine Lösung die für alle Ziele gleichzeitig ein Optimum darstellt. Es ist stattdessen ein „optimaler Kompromiss“ zu ermitteln. In der Literatur werden unterschiedliche Möglichkeiten zur Ermittlung einer Kompromisslösung beschrieben u. a. in Domschke und Drexl (2005). Im simulationsgestützten Assistenzsystem wird die Vorgehensweise der Zieldominanz unter Berücksichtigung von Schranken verwendet. Dabei wird vom Entscheidungsträger eines der zu verfolgenden Ziele zum Hauptziel deklariert. Dieses wird in der Zielfunktion berücksichtigt. Die restlichen Ziele werden zu Nebenzielen erklärt. Für diese wird durch den Anwender eine Obergrenze festgelegt, die nicht überschritten werden darf. Diese Schranken stellen Nebenbedingungen der Zielfunktion dar.

4.2 Ablauf

Einen Überblick über die Bestandteile und den Ablauf des simulationsbasierten Assistenzsystems zur Entscheidungsunterstützung bei der Pflege von Parametern im laufenden Betrieb gibt Abbildung 1 anhand eines frei gewählten Beispiels. In der Reihenfolge des Aufrufs, welche aus den Zahlen in den Kreisen der Grafik entnommen werden kann, werden die einzelnen Schritte nachstehend beschrieben.

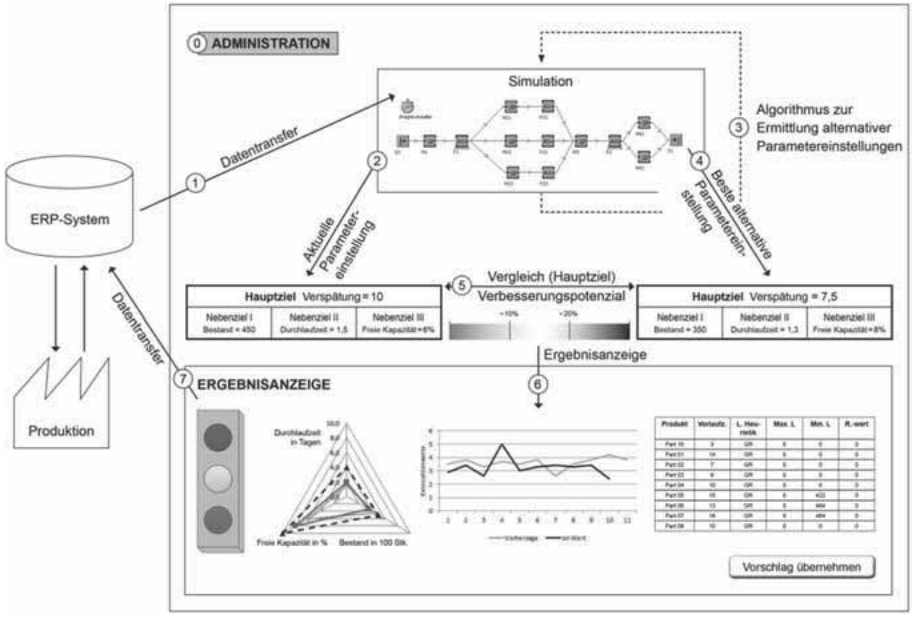


Abbildung 1: *Überblick über die einzelnen Schritte des simulationsbasierten Assistenzsystems*

- Schritt 0: Auswahl Hauptziel und Eingabe der Schranken für Nebenziele

In der Administration des simulationsbasierten Assistenzsystems wird vorab das Hauptziel ausgewählt. Für die meisten Unternehmen steht heute die Einhaltung der Liefertreue im Vordergrund (Wiendahl 2008). Deshalb wird in den folgenden Ausführungen die Verspätung als Hauptziel verwendet. Für die Nebenziele (Bestand, Durchlaufzeit und freie Kapazität) sind die oberen Schranken, welche einzuhalten sind, zu hinterlegen. Diese Einstellung sollte möglichst durch einen Experten vorgenommen werden.

Es sei angemerkt, dass in der Administration weitere Einstellungen vorgenommen werden können. Darauf wird bei den jeweiligen Schritten, in denen diese Konfiguration relevant ist, eingegangen.

- Schritt 1: Datentransfer und Aktualisierung des Simulationsmodells

Das simulationsbasierte Assistenzsystem ist an das ERP-System eines Unternehmens angebunden. Im ersten Schritt werden über die Schnittstelle relevante Daten an das Assistenzsystem übertragen. Dazu zählen u.a. Parametereinstellung, Kundenaufträge, Stücklisten und Arbeitspläne, welche sich seit dem letzten

Ausführungszeitpunkt geändert haben. Diese Änderungen werden in das Simulationsmodell, das Bestandteil des Assistenzsystems ist, übernommen. Das Modell bildet somit die aktuelle Situation des Unternehmens ab.

Es wird vorausgesetzt, dass ein Unternehmen über ein Simulationsmodell verfügt, das für das Entscheidungsunterstützungssystem verwendet werden kann. Dieses muss sowohl die Produktionsplanung des ERP-Systems als auch die Produktion nachbilden und über eine hohe Abbildungsgenauigkeit verfügen.

- Schritt 2: Ergebniskennzahlen für die aktuelle Parametereinstellung

In Schritt 2 wird ein Probebetrieb für zukünftige Perioden unter Verwendung der gleichen Parametereinstellungen, wie im ERP-System, ausgeführt. Der mit Hilfe des Simulationsmodells durchgeführte Simulationslauf liefert als Ergebnis die Werte, die sich für die vier Zielgrößen ergeben. Die Ergebnisse werden gespeichert und im weiteren Verlauf als „aktuelle Parametereinstellung“ bezeichnet. Für Schritt 5 sind diese Werte von Relevanz.

- Schritt 3: Algorithmus zur Ermittlung alternativer Parametereinstellungen

Zur Ermittlung alternativer Parametereinstellungen wurde ein Algorithmus konzipiert, der Bestandteil des Assistenzsystems ist und in Schritt 3 ausgeführt wird. Bevor auf diesen im Detail eingegangen wird, wird zuerst der Lösungsraum skizziert. Für jedes Material der Stückliste kann im SAP-System die Vorlaufzeit in einem Wertebereich von 0–999 eingestellt werden. Ebenso können Rundungswert, maximale und minimale Losgröße in einem Wertebereich von 0–999.999, festgelegt werden. Die Einstellung 0 bedeutet, dass dieser Parameter deaktiviert ist. Zudem kann eine von mehreren zur Verfügung stehenden Losgrößenheuristiken ausgewählt werden.

Bei einem Lösungsraum von dieser Größe ist es nicht möglich, für jede zulässige Parametereinstellungskombination den Wert der Zielgrößen mit Hilfe von Simulation zu ermitteln. Dies liegt daran, dass die Durchführung eines Simulationslaufs zeitaufwändig ist und die im laufenden Betrieb zur Verfügung stehende Zeit überschreiten würde. Deshalb besteht der Algorithmus zur Ermittlung alternativer Parametereinstellungen aus einem regelbasierten Teil 1. Die Regeln basieren auf den bestehenden Einstellungsempfehlungen der Literatur (siehe Kapitel 3) und dienen dazu, interessante Bereiche des Lösungsraums in den Fokus der Suche zu rücken.

In Teil 2 des Algorithmus werden mit Hilfe eines heuristischen Suchverfahrens alternative Parametereinstellungen erzeugt und durch die Simulation bewertet. Die Optimierung erfolgt durch das Simulated Annealing Verfahren. Diese Heuristik wird u. a. in Eglese (1990) beschrieben. Simulated Annealing wurde gewählt, da es einfach zu implementieren ist und Leistungsvergleiche gezeigt haben, dass keine der modernen heuristischen Methoden im Bereich der Optimierung einer anderen eindeutig überlegen ist (Nissen 1997). Die allgemeinen Einstellungen, wie z. B. die sogenannte Starttemperatur des Simulated Annealing, können in der Administration des simulationsbasierten Assistenzsystems angepasst werden. Durch den Algorithmus werden so lange Einstellungskombinationen erzeugt, bis eine der hinterlegten Abbruchbedingungen erreicht ist. Für jede Parametereinstellung wird ein Simulationslauf, analog zu Schritt 2, durchgeführt und die sich ergebenden Werte der Zielgrößen in einer Tabelle gespeichert. Abbruchbedingungen, die den gesamten Algorithmus beenden, stellen die für das simulationsbasierte

Assistenzsystem zur Verfügung stehende Zeit und das Auffinden einer Parametereinstellung, die einen Handlungsbedarf bei der Pflege der Parameter aufzeigt, dar. Erreicht die Temperatur, im Rahmen des Verfahrens Simulated Annealing einen hinterlegten Wert, so wird Teil 1 und anschließend Teil 2 des Algorithmus zur Ermittlung alternativer Parametereinstellungen erneut ausgeführt.

- Schritt 4: Ergebniskennzahlen der besten alternativen Parametereinstellung

Die beste alternative Parametereinstellung aus allen Parametereinstellungen, die zuvor erzeugt wurden, wird in diesem 4. Schritt ermittelt. Dazu wird die Tabelle, in der die Werte der Zielgrößen der unterschiedlichen Einstellungskombinationen gespeichert sind, nach dem Parametersatz untersucht, bei dem die Schranken für die Nebenziele eingehalten werden und das Hauptziel den kleinsten Wert annimmt. Diese Kombination wird im weiteren Verlauf als „beste alternative Parametereinstellung“ bezeichnet. Es sei angemerkt, dass diese Alternative nicht zwangsläufig „optimal“ ist, da der Algorithmus aus Schritt 3 eine Heuristik darstellt. Das Auffinden einer optimalen Lösung ist bei einer Heuristik möglich, kann aber nicht garantiert werden.

- Schritt 5: Ermittlung des Verbesserungspotenzials

Der Wert, der sich für das Hauptziel bei der besten alternativen Parametereinstellung ergeben hat, wird mit dem der aktuellen Parametereinstellung verglichen. Ist der Wert der besten alternativen Parametereinstellung kleiner, so liegt ein Verbesserungspotenzial vor. Durch eine Änderung der Parametereinstellung im ERP-System auf die beste Alternative kann das Hauptziel somit verbessert werden.

Ist hingegen der Wert, der sich bei der aktuellen Parametereinstellung ergeben hat, kleiner, so kann dies bedeuten, dass die Parameter schon sehr gut eingestellt sind. Es kann aber auch darauf zurück zu führen sein, dass die Schranken der Nebenziele zu restriktiv eingestellt waren oder der Algorithmus aus Schritt 3 nicht richtig konfiguriert war und deshalb keine bessere Alternative ermitteln konnte. Es wird empfohlen, die Einstellungen in der Administration zu überprüfen.

Es sei angemerkt, dass diesen Ausführungen zu Grunde gelegt wird, dass die Nebenziele bei der aktuellen Parametereinstellung eingehalten werden und eine „beste alternative Parametereinstellung“ vorliegt. Ist dies nicht der Fall, so liegt ein Sonderfall vor. Aus Platzgründen kann darauf nicht weiter eingegangen werden.

- Schritt 6: Ergebnisanzeige

Als Ergebnis liefern Assistenzsysteme nicht nur Fakten sondern unterstützen durch aufwändige Visualisierungstechniken den Anwender bei der Ergebnisinterpretation (Kuhn und Hellingrath 2002). Für das simulationsbasierte Assistenzsystem wurde eine Ergebnisanzeige konzipiert, die es einem Disponenten ermöglicht, rasch aufzunehmen, ob ein Handlungsbedarf bei der Pflege der Parameter zum aktuellen Zeitpunkt besteht und welche Auswirkungen sich für die Zielsituation ergeben.

Zentrales Element der Ergebnisanzeige ist eine Ampelgrafik, welche signalisiert, ob Handlungsbedarf vorliegt (s. Abb. 1). Dafür ist es erforderlich, dass vorab Schwellenwerte für das Verbesserungspotenzial in der Administration durch einen Experten eingegeben werden. Eine mögliche Einstellung ist z. B. Verbesserungspotenzial < 10 % - Signal grün, < 20 % - Signal gelb und > 20 % Signal rot. Eine rote Ampel signalisiert demzufolge dem Disponenten, dass die Parametereinstellung anzupassen ist, da so ein großes Verbesserungspotenzial

erschlossen werden kann. Eine grüne Ampel zeigt an, dass keine Handlung erforderlich ist. Bei der Festlegung der Schwellenwerte für das Verbesserungspotenzial sind Vision und Kostenstrukturen eines Unternehmens sowie die Gegebenheiten einer Branche zu berücksichtigen. Eine allgemeingültige Einstellungsempfehlung kann demzufolge nicht ausgesprochen werden.

In die Anzeige der Ampelfarbe geht lediglich das Hauptziel ein. Da auch die Ausprägungen der Nebenziele, insbesondere bei der Signalfarbe gelb, von Bedeutung sind, ist ein weiteres Element der Ergebnisanzeige ein Netzdiagramm (s. Abb. 1). Die Achsen stellen die Nebenziele dar; eingezeichnet sind die einzelnen Werte, die sich bei der aktuellen bzw. besten alternativen Parametereinstellung ergeben haben sowie die Obergrenzen.

Die angezeigten Ergebnisse wurden mit Hilfe von Simulation erzeugt. Da ein Simulationsmodell lediglich eine Nachbildung der Realität darstellt und die vollständige Korrektheit nicht nachgewiesen werden kann, sind Verifikation und Validierungsaktivitäten Bestandteil des simulationsbasierten Assistenzsystems. Anhand dieser Aktivitäten soll der Anwender die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse beurteilen können. So ist es möglich, dass in der Ergebnisanzeige, die vorhergesagten Kennzahlenwerte vom letzten Ausführungszeitpunkt mit den tatsächlichen eingetretenen Ist-Werten, in einem Liniendiagramm, gegenübergestellt werden (s. Abb. 1). Auch können Daten, die z. B. für die Durchführung eines Turing-Tests benötigt werden, durch das simulationsbasierte Assistenzsystem zur Verfügung gestellt werden. Dieser Test und die Validierung anhand von Vorhersagen werden in Rabe et al. (2008) im Detail beschrieben.

- Schritt 7: Übernahme der besten alternativen Parametereinstellung

Besteht aus Sicht des simulationsbasierten Assistenzsystems ein Handlungsbedarf bei der Pflege der Parameter des ERP-Systems, so wird dem Disponenten in der Ergebnisanzeige zudem die beste alternative Parametereinstellung in einer Tabelle präsentiert. Diese kann, durch eine Bestätigung durch den Anwender, in das ERP-System übernommen werden (s. Abb. 1). Dazu wird die Schnittstelle, die bereits für Schritt 1 verwendet wurde, genutzt.

4.3 Ausführungszeitpunkt

Ein Disponent benötigt die Information, ob ein Handlungsbedarf bei der Pflege der Parameter besteht, kurz bevor der Planungslauf im ERP-System durchgeführt wird. Das simulationsbasierte Assistenzsystem sollte somit eine gewisse Zeit vor der Durchführung des Planungslaufs, der in der Industrie meist wöchentlich ausgeführt wird, gestartet werden. Die Zeitspanne ist so zu wählen, dass der Algorithmus zur Ermittlung alternativer Parametereinstellungen die Möglichkeit hat, eine Vielzahl an Einstellungskombinationen zu untersuchen. Jedoch auch nicht zu groß, da sonst die für die Simulation verwendeten Daten nicht mehr aktuell sind.

Ändert sich seit dem letzten Ausführungszeitpunkt zum Beispiel die Kundenauftragsstruktur, so wird diese Information in das simulationsbasierte Assistenzsystem übernommen. Das System ermittelt anschießend für die aktuelle Situation des Unternehmens alternative Parametereinstellungen und deren zukünftige Ergebniskennzahlen. Diese werden mit den Kennzahlen der aktuellen Parametereinstellung verglichen. Abhängig von der Höhe des Verbesserungspotenzials, das durch eine Anpassung der Parameter für zukünftige

Perioden erschlossen werden kann, wird einem Disponenten Handlungsbedarf bei der Pflege der Parameter angezeigt.

5 Verbesserungen für Disponenten

Ein Disponent wird durch das beschriebene, simulationsbasierte Assistenzsystem bei den Entscheidungen, ob und wie zum aktuellen Zeitpunkt bei einem Material die Parameter anzupassen sind, unterstützt. Damit er seine Entscheidung fundiert treffen kann, werden mit Hilfe von Simulation die Auswirkungen auf die einzelnen Zielgrößen für zukünftige Perioden ermittelt und anzeigt. Dieses System ermöglicht es, wie in der Literatur empfohlen, nach jeder Veränderung der Umweltfaktoren bzw. Verbesserung des Systems die Parameter zu prüfen und ggfs. anzupassen. Aufgrund der beschriebenen Herausforderungen ist dies ohne eine entsprechende Entscheidungsunterstützung im laufenden Betrieb kaum möglich.

Das simulationsbasierte Assistenzsystem zur Entscheidungsunterstützung bei der Pflege der Parameter verfügt über eine effektive und anwendungsgemäße Ergebnispräsentation. Dadurch kann ein Anwender die Ergebnisse rasch aufnehmen. In Analogie zum Berichtswesen ist davon auszugehen, dass das System verhaltensbeeinflussend auf einen Disponenten wirkt. Laut Taschner (2013) stellt die Tatsache, dass eine Berichtsinformation potenziell verfügbar ist oder sein wird, bereits eine Reduzierung der Unsicherheit für den Akteur dar, welche das weitere Handeln beeinflusst.

Ein weiterer Vorteil des simulationsbasierten Assistenzsystems ist, dass die Werte, die sich für die Zielgrößen in der nächsten Periode voraussichtlich ergeben werden, vorab bereits bekannt sind. Ist ein Unternehmen mit den Kennzahlen, die sich trotz Anpassung der Planungsparameter voraussichtlich ergeben werden, nicht zufrieden, so können frühzeitig weitere Maßnahmen eingeleitet werden.

6 Bewertung und Ausblick

Wie gut das vorgestellte simulationsbasierte Assistenzsystem in der Praxis funktioniert, ist stark davon abhängig, wie gut das Simulationsmodell die Planung und Produktion nachbildet. Nur wenn die Ergebniskennzahlen glaubhaft sind, ist das Entscheidungsunterstützungssystem eine Hilfe für Disponenten. Die Wirtschaftlichkeit des Systems ist abhängig von Kosten und vom Nutzen, die durch das System verursacht werden. Jedes Unternehmen muss selbst bewerten, welchen Wert das Erschließen des evtl. vorliegenden Verbesserungspotenzials, die geschaffene Sicherheit bei der Pflege der Parameter und die Entlastung der Disponenten hat.

Aktuell wird ein Prototyp des vorgestellten simulationsbasierten Assistenzsystems entwickelt. Dazu wird Plant Simulation von Siemens Technomatrix verwendet. Mit Hilfe von realitätsnahen Fallbeispielen soll anschießend die Funktionsweise des Prototyps des Entscheidungsunterstützungssystems nachgewiesen werden. Wird dieser Nachweis positiv abgeschlossen, so ist es grundsätzlich möglich, analoge simulationsbasierte Assistenzsysteme für weitere Parameter eines ERP-Systems oder für ein Supply-Chain-Management (SCM) System zu entwickeln.

Literatur

Dittrich, J.; Mertens, P.; Hau, M.; Hufgard, A.: Dispositionsparameter in der Produktionsplanung mit SAP. 5. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.

Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. 6. Auflage, Berlin u. a.: Springer, 2005.

Eglese, R. W.: Simulated Annealing: A tool for Operational Research. European Journal of Operational Research 46 (1990), S. 271-281.

Gulyássy, F.; Hoppe, M.; Isermann, M.; Köhler, O.: Disposition mit SAP. Bonn: Galileo Press, 2009.

Hartinger, M.: Die Pflege der Parameter von Standardsoftware. Wiesbaden, 1995.

Hau, M.: Parameter. In: Mertens, P. (Hrsg.): Lexikon der Wirtschaftsinformatik: 4. Auflage, Berlin u. a.: Springer, 2001, S. 362-363.

Hauß, Y.; Timpe, K.-P.: Automatisierung und Unterstützung im Mensch-Maschine-System. In: Timpe, K.-P.; Jürgensohn, T.; Kolrep, H. (Hrsg.): Mensch-Maschine-Systemtechnik. Düsseldorf: Symposion, 2002, S. 41-62.

Herrmann, F.: Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.

Herrmann, F.; Stumvoll, U.: Einstellung von Losgrößenheuristiken in ERP- bzw. PPS-Systemen. In: Proceedings zu den 7. Wismarer Wirtschaftsinformatik-Tagen an der Hochschule Wismar, Wismar (Deutschland), 3.-4. Juli 2010.

Jodlbauer, H.: Produktionsoptimierung. 2. Auflage, Wien: Springer, 2008.

Kernler, H.: Programme werden selbstständig. Logistik Heute 10 (1994), S. 101-102.

König, W.; Rommelfanger, H.; Ohse, D.; Wendt, O.; Hofmann, M.; Schwind, M.; Schäfer, K.; Kuhnle, H.; Pfeifer, A.: Taschenbuch der Wirtschaftsinformatik und Wirtschaftsmathematik. Frankfurt am Main: Deutsch, 2003.

Kuhn, A.; Hellingrath, H.: Supply Chain Management. Berlin u. a.: Springer, 2002.

Mertens, P.; Wedel, T.; Hartinger, M.: Management by Parameters?. Zeitschrift für Betriebswirtschaft 61 (1991) 5/6, S. 569-588.

Nissen, V.: Einführung in evolutionäre Algorithmen. Braunschweig: Vieweg, 1997.

Plossl, G. W.: Manufacturing Control. Reston: Reston Publishing, 1973.

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin u. a.: Springer, 2008.

Schaffry, A.: SAP, Oracle und Microsoft im Vergleich. http://www.cio.de/knowledgecenter/erp/2887557/, 2012, Zuletzt geprüft am 19.5.2013.

Taschner, A.: Management Reporting. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.

Tempelmeier, H.: Material-Logistik. 6. Auflage, Berlin u. a.: Springer, 2006.

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure, 6. Auflage, München: Hanser, 2008.

Wedel, T.: Wissensbasierte dynamische Konfiguration der Parameter von Standardpaketen zur Produktionsplanung und -steuerung am Beispiel des IBM-Modularprogramms COPICS. Universität Erlangen-Nürnberg, 1990.

Wemmerlöv, U.: The ubiquitous EOQ - its relation to discrete lot sizing heuristics. Journal of Operations & Production Management 1 (1981), S. 161-179.

Wemmerlöv, U.: A comparison of discrete, single stage lot-sizing heuristics with special emphasis on rules based on the marginal cost principle. Engineering Costs and Production Economics 7 (1982), S. 45-53.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Fabrikmodelle für Job-Shop-Scheduling-Algorithmen in Changing-Steady-State-Systemen

Factory Models for Job Shop Scheduling Algorithms in Changing-Steady-State Systems

Markus Rabe, Maik Deininger, TU Dortmund, Dortmund (Germany),
markus.rabe@tu-dortmund.de, maik.deininger@tu-dortmund.de

Abstract: Manufacturing systems that are affected by regular changes like e.g., mid-series production, show a complex and multi-layered behaviour over time. Simulation is known as a well-suited technology for such problems, but modelling techniques to cover this type of changing-steady-state systems are still rare. This paper introduces an approach of "Modular Factory Models" (MFM) describing a small portion of such a system over its complete lifecycle from the acquisition decision to disappearance and the interrelationships of this portion with the resources required from the system as a whole. Integrating these MFM into one (potential) scenario enables simulation. However, this simulation will require combining simulation with optimization techniques in order to search for feasible configurations in the huge solution space. Therefore, scheduling algorithms have to be applied together with heuristic optimization and simulation.

1 Einführung

Die mittelfristige Produktionsplanung ist eine komplexe Aufgabe für produzierende Unternehmen. Die Frage, ob ein zusätzlicher Auftrag fristgerecht erfüllbar ist und welche Auswirkungen dies auf die laufende Produktion haben könnte, wird oft ohne wirkliche Grundlage – und zwar meist positiv – beantwortet, woraus erhebliche Turbulenzen in der Auftragsbearbeitung entstehen können. Dem Produktionsplaner ist häufig nicht klar, dass ein neu gewonnener Auftrag insgesamt einen negativen Einfluss auf das Betriebsergebnis haben kann. Dieser Fall tritt insbesondere in der Zulieferindustrie auf, wo der einzelne Auftrag für eine wiederkehrende Kleinserie – über Monate oder Jahre aktiv – erhebliches Gewicht hat und dennoch Anfragen zu neuen Aufträgen fast täglich anfallen können. Daher sind Methoden erforderlich, mit denen Aufträge schnell eingeplant und deren Auswirkungen bewertet werden können, um eine fundierte Entscheidung über die Annahme eines neuen Auftrages treffen zu können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im zeitlichen Betrachtungshorizont Modifikationen der Ressourcen nicht nur möglich, sondern sogar üblich sind. Derartige Veränderungen erfordern jedoch nicht nur Zeit für die

Durchführung, sondern auch den Zugriff auf Ressourcen aus dem „restlichen" System, wie etwa Einrichter, Instandhalter, Vorrichtungen, Werkzeuge, Flächen oder auch Teile für Testläufe.

Die VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 (VDI 2010) unterscheidet Anwendungsfälle der Simulation danach, ob das System oder die Systemlast unbekannt ist. Diese Unterscheidung ist für unsere Betrachtung weiter zu differenzieren. Die Systemlast kann in der ersten Näherung als bekannt angenommen werden, da sowohl die bereits akzeptierten Aufträge als auch der neu betrachtete Auftrag eindeutig gegeben sind (die Betrachtung weiterer bereits angebotener Aufträge mit entsprechenden Risikobewertungen sei hier nicht diskutiert). Ist auch das System bekannt, so bestehen die Freiheitsgrade noch darin, welche Aufträge wann auf welchen Anlagen eingeplant werden. Für diesen Fall wurden Job-Shop-Scheduling-Algorithmen und -Modelle entwickelt (vgl. Aytug et al. 1994), mit denen Konflikte in der Planung schnell erkennbar und auch behebbar sind. In Kombination mit Simulationsverfahren (vgl. März und Krug 2011; Nedeß et al. 2008) lässt sich zusätzlich effizient prüfen, ob es bei der geplanten Zuordnung während der laufenden Produktion zu ungewollten Wartezeiten oder Lieferverzügen kommt. Jedoch ist das damit erforderliche fortwährende Anpassen der Planung in Anbetracht der enormen Menge an Möglichkeiten sehr aufwendig. In der Konsequenz wurden für das Job-Shop-Scheduling Optimierungsverfahren entwickelt (vgl. Arnaout et al. 2010; Chiu et al. 2007; Lestan et al. 2009; Tamilarasi und Anantha kumar 2010). Die Verfahren haben zum Ziel, die Produktion so zu gestalten, dass unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen beliebige Kriterien möglichst gut erfüllt werden, wobei aber eine im mathematischen Sinne optimale Lösung oft nicht gefunden werden kann.

Lässt sich der Auftrag mit dem existierenden System nicht einplanen, so erweitert sich die Fragestellung zur Untersuchung von sogenannten Changing-Steady-State-Systemen (vgl. Robinson 2004), da zu unterschiedlichen (zukünftigen) Zeitpunkten geplante Änderungen am System auftreten. Das System ist dabei im strengen Sinne immer noch bekannt; Simulations- und Optimierungsverfahren müssen jedoch die Veränderung des Systems über der Zeit mit betrachten. Die Komplexität besteht dabei insbesondere aus der starken Vernetzung der erforderlichen Ressourcen. Hierzu seien als Beispiele genannt:

- Der Einsatz von Einrichtern an einer neu zu installierenden Anlage reduziert deren Verfügbarkeit an laufenden Anlagen
- Zum Test einer neuen Anlage müssen – möglicherweise ebenfalls eigengefertigte – Halbfertigteile bereits in ausreichender Stückzahl verfügbar sein
- Das Verschieben von Aufträgen auf andere – alte oder neue – Anlagen erfordert die Qualifizierung sowohl der Anlage als auch der Bediener auf das Produkt und entnimmt damit dem System temporär Anlagen- und Personalkapazität

Die Möglichkeiten zur Veränderung des Systems reichen von der Qualifizierung bestehender Anlagen oder Werker auf andere Produkte über das Einstellen zusätzlichen Personals bis hin zur Beschaffung und Inbetriebnahme neuer Anlagen sowie letztlich auch zum Ersatz von existierenden, nicht hinreichend leistungsfähigen oder flexiblen Anlagen. Damit wird eine Anpassung des dem Job-Shop-Scheduling zu Grunde liegenden Modelles auf die Frage: „Was muss an der Produktionsanlage geändert werden, damit alle Aufträge zu erfüllen sind?"

erforderlich. Abbildung 1 zeigt eine mögliche Vorgehensweise, die eine Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells ermöglicht. Ist die direkte Einplanung nicht möglich, so kommt eine Heuristik zum Tragen, die das vorhandene Fabrikmodell gezielt verändert und ein Modell an die Simulation zur Prüfung liefert. Als Kern der Heuristik werden „modulare Fabrikmodelle" vorgeschlagen, die geeignet in das existierende Fabrikmodell einzugliedern sind. Der Beitrag zeigt in einem ersten Schritt auf, wie durch modulare Fabrikmodelle Veränderungen an einem existierenden Fabrikmodell über der Zeit beschrieben werden können.

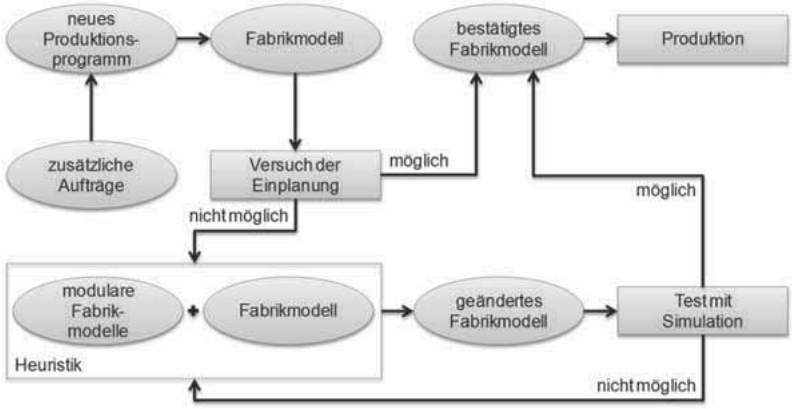


Abbildung 1: *Ablaufplan für die Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells*

In diesem Zusammenhang soll das Fabrikmodell das Produktionssystem mit seinen Maschinen, dem Personal- und Materialbedarf beschreiben. Die Maschine als solches wird hier als „Blackbox" betrachtet, lediglich der Ressourcenbedarf und das hergestellte Produkt sind von Interesse.

Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: Nach dieser Einführung in die Problemstellung und der Betrachtung der relevanten Literatur wird zunächst der Modellierungsansatz dargestellt, mit dem die Changing-Steady-State-Formulierung für Produktionssystem und Produktionsplan erfolgt. Hieraus werden die Anforderungen an das Simulationsmodell und die erforderliche Heuristik abgeleitet, um darauf aufbauend die Möglichkeiten des neuen Ansatzes aufzuzeigen und abzugrenzen. Im Anschluss wird anhand der Beschaffung einer neuen Maschine gezeigt, wie sich die modularen Fabrikmodelle zusammensetzen und wie diese miteinander interagieren. Abschließend werden in einem Ausblick die nächsten Schritte aufgezeigt.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel legt den aktuellen Stand der Technik dar. Beginnend mit dem Job-Shop-Scheduling wird gezeigt, welche Techniken zur Verfügung stehen um die aktuellen Aufträge auf einer vorhandenen Produktionsanlage einzuplanen. Anschließend erfolgt die Betrachtung von Optimierungs- und Simulationsverfahren, wobei der Anwendungsbereich des Job-Shop-Scheduling im Fokus steht. Das

Kapitel schließt mit der Betrachtung von Modellierungstechniken, welche einerseits die Grundlage der beschriebenen Techniken darstellen und andererseits als Basis für den hier entwickelten Ansatz dienen können.

2.1 Job-Shop-Scheduling

Die Techniken des Job-Shop-Schedulings (JSS) dienen der Ablaufplanung in verschiedenen Fachgebieten. In der Produktion werden durch das JSS die Aufträge und Ressourcen auf die vorhandenen Maschinen verteilt, wodurch sich die Produktionspläne ableiten lassen. Die neusten Entwicklungen zeigen, dass dem JSS zunehmend eine Kombination neuer und etablierter Techniken zu Grunde gelegt wird, um die Qualität zu steigern und den Anwendungsbereich zu erweitern. (vgl. Arnaout et al. 2008; Guo et al. 2009; Lestan et al. 2009; Udomsakdigool und Kachitvichyanukul 2008).

2.2 Optimierungsmethoden

Dieser Abschnitt soll aktuelle Optimierungsmethoden betrachten, die ein möglichst breites Anwendungsgebiet erschließen. Da analytische Verfahren starke Einschränkungen oder sehr hohe Rechenzeiten erfordern (vgl. Wang et al. 2010, Solyali und Özpeynirci 2009), werden diese hier nicht weiter betrachtet.

2.2.1 Genetische Algorithmen

Der Genetische Algorithmus (GA) zählt zu den am weitesten verbreiteten Optimierungsverfahren, womit ein großes Anwendungsgebiet erschlossen wird und eine große Vielfalt von GA existiert. Für das hier betrachtete Feld sind insbesondere die Arbeiten von Gao et al. (2005) und Lestan et al. (2009) von Bedeutung, die die Eignung des GA für das Scheduling aufzeigen. Neben der Vereinfachung der Algorithmen, wie in der Arbeit von Lestan et al. (2009) gezeigt, tendieren aktuelle Forschungen dazu den GA mit anderen Techniken zu verbinden, um Qualität und Effizienz zu steigern. In erster Linie erfolgt eine Kombination mit anderen Heuristiken, wie Tabu-Search (Chiu et al. 2007), Ant-Colony-Algorithmen (Girish und Jawahar 2009) oder Simulated Annealing (Tamilarasi und Anantha kumar 2010). Aber auch die Kombination mit exakten Lösungsverfahren wie Branch and Bound (Morita und Shio 2005) ist zu finden. Da analytische Verfahren zumeist sehr aufwendig sind oder das Anwendungsgebiet stark einschränken, ist deren Einsatzgebiet deutlich geringer als der von Heuristiken.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der GA in allen Anwendungsgebieten zielführend einsetzbar ist. Wie die Beispiele zeigen, muss man jedoch viel Energie in die Kodierung der Daten und die Implementierung geeigneter genetischer Operatoren, wie Mutation und Kreuzung, stecken, damit die Optimierung effizient abläuft.

2.2.2 Partikel-Schwärme

Eine vielversprechende Gruppe von Algorithmen stellen die Partikel-Schwarm-Algorithmen dar (Kennedy und Eberhart 1995). Wie die genetischen Algorithmen orientiert sich die Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO) an der Natur. Im speziellen wird das Verhalten von Fischschwärmen bei der Nahrungssuche nachgebildet. Der Vorteil liegt hier bei der Einfachheit der verwendeten Operationen. Man beschränkt

sich auf das gewichtete Mittel verschiedener Suchrichtungen, statt aufwendige Operatoren anzuwenden.

Trotz des wesentlich geringeren Alters der Partikel-Schwarm-Algorithmen, im Vergleich zum GA, wurde bereits ein weites Anwendungsgebiet erschlossen. Die Arbeit von Eberhart und Shi (1998) zeigt, dass PSO und GA sowohl Ähnlichkeiten in den Lösungsstrategien als auch in der Lösungsqualität aufweisen. Subbaraj et al. (2010) nutzen PSO zur Lösung von Dispatching-Problemen und zeigen sowohl die Anwendbarkeit als auch die Modifizierbarkeit der PSO, indem sie die Gewichtung der Suchrichtungen durch stochastische Funktionen ersetzen. Ein weiteres Anwendungsfeld wurde von Logenthiran und Srinivasan (2010) erschlossen, indem sie mittels verschiedener PSO-Varianten die optimale Auslastung von Generatoren zur effizienten Energiegewinnung bestimmten und damit Anwendbarkeit und Anpassungsfähigkeit der PSO zeigten.

2.3 Simulation und Optimierung

In produktionslogistischen Systemen werden durch Unstetigkeiten in den Systemen (Changing Steady States) hohe Anforderungen an die Simulation gestellt. Die Abbildung der Anforderung ist meist sehr komplex und lässt die Diskrete-Event-Simulation (DES) als beste Wahl erscheinen. Gestärkt wird dies durch das breite Anwendungsfeld der DES und führt dazu, dass im folgenden die DES betrachtet wird.

Der Ansatz, wie er im Folgenden vorgestellt wird, ist in die simulationsbasierte Optimierung einzuordnen. März und Krug (2011) zeigen vier Möglichkeiten der Verknüpfung von Simulation und die Optimierung auf. Von diesen erscheint es am sinnvollsten, die Simulation als Bewertungsfunktion der Optimierung für das betrachtete Problem zu nutzen.

3 Modulare Fabrikmodelle zur Beschreibung von Produktionssystemen in Changing Steady States

Bei der Betrachtung der hier beschriebenen Produktionssysteme gibt es auf der einen Seite die Produktionsanlagen im aktuellen Zustand und auf der anderen Seite Möglichkeiten, diese zu verändern. Hierzu zählt beispielsweise die Beschaffung neuer Anlagen, die Veränderung des Personals in Menge und Qualifikation oder die Umstellung des Schichtsystems.

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, basiert die Erzeugung eines geänderten Fabrikmodells auf zwei Säulen: Zum einen wird ein Modell des vorhandenen (bzw. aktuell geplanten) Systems benötigt; zum anderen bedarf es eines Pools an möglichen Modifikationen. Die Elemente in diesem Pool werden durch modulare Fabrikmodelle (MFMs) repräsentiert, die sich in die vorhandene Produktionsanlage integrieren lassen. Jedes dieser MFMs beschreibt für eine spezifische Veränderung alle Phasen von der Bedarfsfeststellung bis zur Produktionsbereitschaft. Jede einzelne dieser Phasen besitzt Anfangs- und Nebenbedingungen, die den Ressourcenbedarf charakterisieren. Grundsätzlich kann es erforderlich sein, mehrere MFMs einzufügen, um die Anfangs- und Randbedingungen erfüllen zu können. Somit entsteht ein gerichteter Graph, der alle Veränderungsprozesse und deren zeitliche Abfolge darstellt. Bei komplexen Graphen besteht die Möglichkeit, dass

zwei Prozesse gleiche Nebenbedingungen stellen, wie beispielsweise den Bedarf vom gleichen Ausgangsmaterial. Hier gilt es zu prüfen, ob durch die Erfüllung der Bedingung der anderen Phase bereits die eigene Nebenbedingung erfüllt ist. Aufbauend auf diesem Modellierungsansatz lassen sich Heuristiken entwerfen, um automatisch und gezielt neue Fabrikmodelle zu erstellen, die das aktuelle Modell im Verlauf der Zeit ablösen. Da das aktuelle Fabrikmodell ebenfalls aus MFMs aufgebaut ist, lassen sich die vorgeschlagenen Lösungen leicht integrieren, womit die Möglichkeit eröffnet wird, in einer nachgelagerten Simulation die von der Heuristik vorgeschlagenen Anpassungen zu validieren. Je nach Ergebnis kann das vorgeschlagene Fabrikmodell in die reale Fabrik übertragen oder ein neuer Lauf der Heuristik gestartet werden. Die Herausforderung besteht in dieser Phase in der geschickten Wahl des Simulationsmodells.

3.1 Detailierungsgrad und Betrachtungshorizont

Bereits das einfache MFM in Abbildung 2 lässt erahnen, dass der Personalbedarf bei der Modellierung einen großen Teil zur Komplexität beiträgt, womit die Verfügbarkeit des Personals weit in den Vordergrund rückt. Nicht nur der hohe Bedarf an Arbeitsstunden, sondern auch die sich ergebenden Auswirkungen auf die laufende Produktion erfordern eine intensive Betrachtung. Ein leicht zu erkennender Fall ist, dass ein Werker, der soeben auf der neuen Maschine qualifiziert wird, nicht für die laufende Produktion zur Verfügung steht, womit ein Ausgleich geschaffen werden muss. Dies kann durch einen anderen Werker geschehen oder durch eine erhöhte Produktion des betroffenen Produktes im Vorfeld. Durch die Modellierung wird verdeutlicht, dass ebenso Angestellte der Verwaltung beansprucht werden. Hier lassen sich jedoch Unterschiede ausmachen. Der Werker wird für längere Zeit voll beansprucht, wohingegen der Angestellte in der Regel nur kurze Zeit benötigt, um die zusätzlich anfallenden Aufgaben zu erfüllen und sich somit schnell wieder anderen Aufgaben widmen kann.

Dies führt zu einer Unterscheidung des Personals, in deren Konsequenz die Angestellten für den hier beschriebenen Ansatz als immer verfügbare Ressource angesehen werden. Damit lässt sich wiederum die Modellierung vereinfachen, indem die Angestellten nicht mit einbezogen werden. In einem nächsten Schritt können auch Routineaufgaben mit geringem Zeitaufwand und vernachlässigbaren Randbedingungen ebenfalls weggelassen werden.

Beim Materialbedarf lässt sich eine vergleichbare Unterscheidung nach Zukauf- und Eigenfertigungsteilen treffen. Da die eigengefertigten Teile von den Abläufen in der Fabrik abhängen, müssen diese in der Modellierung betrachtet werden. Dies gilt insbesondere, wenn diese für die Qualifizierung einer Maschine erforderlich sind und somit nicht mehr zum Verkauf oder für nachgelagerte Produktionsschritte bereitstehen. Einkaufteile, die bei Bedarf zu bestellen sind, lassen sich zwei Kategorien unterscheiden: Kommt es bei Einkaufteilen mit kurzer Lieferzeit und hoher Verfügbarkeit zu einem Engpass, können Teile schnell nachbestellt werden, so dass eine Beeinflussung der Produktion nicht wahrscheinlich ist. Daher lassen sich diese als immer verfügbare Ressource ansehen und bei der Modellierung vernachlässigen. Einkaufteile, die diese Annahmen nicht erfüllen, sind hingegen zu berücksichtigen. So sind beispielsweise Sonderstähle oft mit Lieferzeiten versehen, die im Vergleich zur Vorlaufzeit für die Einplanung neuer Aufträge relevant sind.

3.2 Modellierungsansatz

Zur Darstellung von Abläufen, wie die Beschaffung einer Maschine oder die Einstellung neuen Personals, finden MFMs, die untereinander in Beziehung gesetzt werden können, Verwendung. Jedes einzelne MFM beschreibt die Prozesse von der Bedarfsfeststellung bis zur Einsatzbereitschaft der Maschine. Abbildung 2 (links) zeigt ein einfaches Beispiel. Jeder Prozess besitzt sowohl Randbedingungen (RB) als auch Anfangsbedingungen (AB), die beschreiben, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit der Prozess beginnen kann. Die Prozesse eines MFMs lassen sich entlang der Zeitachse verschieben, damit diese an die Verfügbarkeit von Ressourcen angepasst werden können. Abbildung 2 (rechts) zeigt ein MFM, wie es nach einem Schedulingdurchlauf aussehen könnte. Hier ist neben den Prozessen exemplarisch die Verfügbarkeit des Personals angedeutet, um zu verdeutlichen, warum die Möglichkeit der zeitlichen Verschiebungen von Prozessen gegeben sein muss.

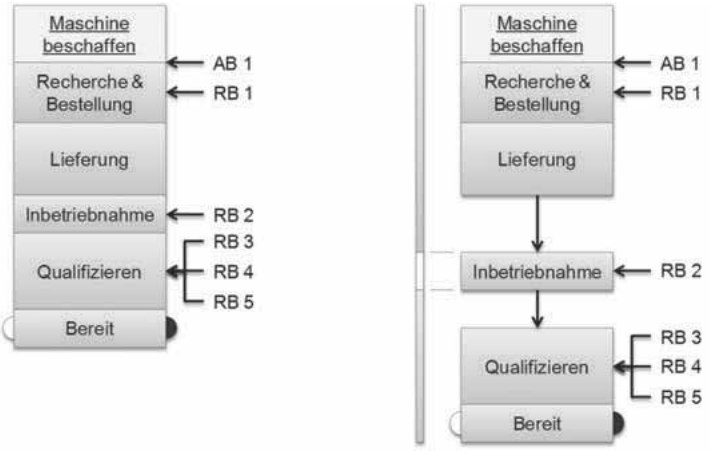


Abbildung 2: *Modulares Fabrikmodell für die Beschaffung einer Maschine (links nicht eingeplantes Modell, rechts eingeplantes Modell unter Berücksichtigung von Ressourcen)*

Weiterhin lässt sich jeder Prozess parametrisieren, um für nachgelagerte Verfahren, wie JSS, Simulation oder Optimierung, alle benötigten Daten bereitzustellen. So werden beispielsweise für das JSS unter anderem Informationen über Ressourcenbedarf und Prozessdauer benötigt, wohingegen die Dauer von Prozessen für die Optimierung beim Zusammenfügen von MFMs zweitrangig ist.

Der letzte Abschnitt („Bereit“) eines MFMs ist der Bereitstellungsprozess, bei dem alle Informationen bereitzustellen sind, um die Maschine oder Ressource in die Produktion einzugliedern. Hierfür sind Kombinationen von Eingängen (weiße Halbkreise) und Ausgängen (schwarze Halbkreise) vorgesehen, die beschreiben, aus welchen Ressourcen welches Produkt herstellbar ist.

3.3 Zusammenführen der modularen Fabrikmodelle

Nachdem alle erforderlichen MFMs erzeugt wurden, lassen sich diese zu einem Gesamtmodell vereinen, welches nicht nur die aus der Beschaffung einer Maschine

direkt ersichtlichen Prozesse enthält, sondern auch jene, die die Voraussetzungen dafür schaffen.

Durch die Modellierung der MFMs und deren Prozesse ergeben sich Anfangs- und Randbedingungen, die es zu erfüllen gilt. Dies erfolgt durch die Verknüpfung mit anderen MFMs. Damit dies möglich ist, muss der Bereitstellungsprozess eines MFMs einen Ausgang (schwarzer Halbkreis) besitzen, welcher die Bedingung erfüllt. Folglich muss für jede Bedingung ein passendes MFM erzeugt werden. Demzufolge muss es auch MFMs geben, die den Zugriff auf Ressourcen erlauben, die bereits von der Fabrik bereitgestellt werden. Diese Zugriffe auf die Fabrik werden durch spezielle MFMs dargestellt, die lediglich aus einem Bereitstellungsprozess mit passendem Ausgang bestehen.

Abbildung 3 zeigt ein einfaches zusammengesetztes Modell, das die Beschaffung einer Maschine darstellt. Nach der Umsetzung der Vereinfachungen aus Abschnitt 3.2 verbleiben zwei zusätzliche MFMs, welche die Randbedingungen für das mittlere MFM erfüllen und selbst keine weiteren Bedingungen stellen. Durch das Teilmodell rechts wird das für die Qualifizierung nötige Personal aus der Fabrik beansprucht. Das Teilmodell links sorgt für die Einstellung eines neuen Werkers, den es zu qualifizieren gilt. Bei der jeweiligen Qualifizierungsphase gibt es eine Kopplung, da sowohl das Personal als auch die Maschine sich gegenseitig benötigen, um den Prozess zu durchlaufen. Als Ergebnis steht am Ende neben der Maschine auch ein qualifizierter Werker zur Verfügung.

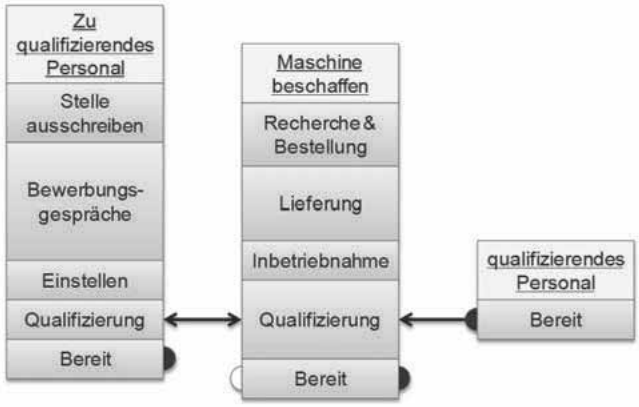


Abbildung 3: *Zusammengesetzte modulare Fabrikmodelle*

Das manuelle Zusammenfügen der Modelle stellt eine aufwendige Aufgabe dar, insbesondere wenn viele Möglichkeiten durchzutesten sind. Deshalb sollte dieser Arbeitsschritt durch geeignete Optimierungstechniken unterstützt werden. Die Partikel-Schwarm-Optimierung scheint besonders geeignet, da der Aufwand der Kodierung gering ist und die Optimierung ausschließlich auf einfachen mathematischen Berechnungen beruht, welche nur wenige Parameter erfordern. Die damit einhergehende Effizienz erlaubt es, vergleichsweise komplexe Fitness-Funktionen zu verwenden. In diesem Fall enthält die Fitness-Funktion Scheduling- und Simulations-Algorithmen zur Bewertung der Lösung. Damit der Lösungsraum

effizient durchsucht werden kann, muss ein Vorverarbeitungsschritt erfolgen. Man könnte sich vorstellen, alle möglichen Kombinationen von MFMs zu berechnen, um anschließend die PSO für die Auswahl zu verwenden. Allerdings werden so sehr viele Modelle erzeugt, die von vornherein nicht in Frage kommen. Effizienter ist es, jene Modelle zu kennzeichnen, die zur Erfüllung der neuen Auftragssituation in Frage kommen und anschließend, während der Optimierung, die sich ergebenden Varianten auszutesten. Damit wird zum einen der Lösungsraum deutlich reduziert und es werden nur jene Modelle erzeugt, die auch durch die Simulation bewertet werden. Die Anzahl der erzeugten und bewerteten Modellvarianten lässt sich somit über Abbruchkriterien steuern. Bedenkt man, dass in der Praxis oft eine hinreichend gute Lösung ausreichend ist und ein heuristisches Verfahren nicht nachweisen kann, dass eine optimale Lösung gefunden wurde, erscheint dieses Vorgehen sinnvoll, um die benötigte Rechenzeit zu reduzieren.

3.4 Job-Shop-Scheduling und Simulation

Jeder vom Optimierer gewählte Lösungsvorschlag wird in das Fabrikmodell integriert und das resultierende Modell dem Job-Shop-Scheduling vorgelegt. Hier sind die vorhandenen Ressourcen und Aufträge bestmöglich zu verteilen. Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, existieren hier bereits viele Verfahren, die erfolgreich angewendet werden. Ebenso wurde gezeigt, dass Ausfallzeiten von Maschinen, wie sie hier benötigt werden, kaum Betrachtung fanden.

Im vorgestellten Ansatz ist die explizite Betrachtung der Zeit, in der eine Maschine nicht verfügbar ist, unumgänglich. Vereinfachend für die Simulation ist, dass die Zeiträume bereits in der Modellierung angegeben werden, so dass es sich hier um planbare Ereignisse und nicht um zufällige Störungen handelt. Daher lassen sich Prozesse, wie der Aufbau oder die Qualifikation, als Aufträge interpretieren, die an eine Maschine gebunden sind und zeitlich als nicht variabel zu betrachten sind.

Anschließend wird das so ermittelte Produktionssystem durch eine Simulation analysiert. Je nach Komplexität und verfügbarer Zeit für die Analysen ließen sich bei der Simulation verschiedene Detailierungsgrade betrachten. Da jedoch mitunter sehr viele Möglichkeiten untersucht werden müssen und die Komplexität im Allgemeinen als eher hoch anzusehen ist, können nicht die Zustandsänderungen an den Produkten betrachtet werden. Vielmehr muss man bei der Simulation Änderungen am Produktionssystem oder bei der Auftragszuordnung als Ereignisse betrachten, da andernfalls die Laufzeiten der Simulation ein heuristisches Vorgehen unmöglich machen würden. Somit gilt es, die Ereignisse an der Fertigung einzelner Batches festzumachen, das heißt an die Belegung der Maschine durch einen Produkttyp. Je nach Länge der Bearbeitungszeit ist es sinnvoll, eine komplette Serie zu betrachten oder in Sonderfällen auch die Fertigung von nur wenigen Produkten. Demzufolge gilt es, den Detailierungsgrad je nach gefertigtem Produkt individuell anzupassen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht, einen durch Wandlung geprägten Produktionsprozess abzubilden. Dazu kommen modulare Fabrikmodelle zum Einsatz, mit denen mögliche Änderungen an einem

Fabrikmodell beschrieben werden. Die Auswahl und Eingliederung in das Modell der aktuellen Fabrik erfolgt durch einen Partikel-Schwarm-Algorithmus, der jeden Lösungsvorschlag durch Job-Shop-Scheduling und Discrete Event Simulation auswerten lässt, um so eine möglichst gute Lösung zu ermitteln.

Damit wird an der Umsetzung des vorgestellten Modellierungsansatzes in einer geeigneten Modellierungstechnik gearbeitet. Am vielversprechendsten scheinen objektorientierte Ansätze, wie die Integrierte Unternehmensmodellierung oder objektorientierte Petrinetze, da diese sehr flexibel und auf Grund der Objektorientierung leicht modifizierbar und erweiterbar sind.

Vorerst wurde lediglich die *Beschaffung* einer Maschine betrachtet. Als weiterführender Schritt ist ebenfalls der Umgang mit dem Abbau einer Maschine zu untersuchen, um Überkapazitäten in einer Fabrik abbauen zu können. Prinzipiell ist dies sehr ähnlich zur Beschaffung, da sich der Abbau in mehrere Prozesse zerlegen lässt, die ihrerseits Ressourcen der Fabrik beanspruchen. Diese Betrachtung scheint, wenn man die Erfüllung von Aufträgen betrachtet, auf den ersten Blick nicht sehr bedeutend zu sein. Der Fall kann jedoch wichtig sein, wenn es darum geht, Platz für eine andere Maschine zu gewinnen oder die Kosten zu optimieren.

Literatur

Arnaout, J.-P.; Musa, R.; Rabadi, G.: Ant colony optimization algorithm to parallel machine scheduling problem with setups. In: 2008 IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Arlington, Va, 23-26 August 2008. Piscataway, USA, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, S. 578–582.

Arnaout, J.-P.; Rabadi, G.; Musa, R.: A two-stage Ant Colony Optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. In: Journal of Intelligent Manufacturing 21 (2010) 6, S. 693–701.

Aytug, H.; Bhattacharyya, S.; Koehler, G. J.; Snowdon, J. L.: A review of machine learning in scheduling. In: IEEE Trans. Eng. Manage. 41 (1994) 2, S. 165–171.

Chiu, H.-P.; Hsieh, K.-L.; Tang, Y.-T.; Wang, C.-Y.:A Tabu Genetic algorithm with Search Area Adaptation for the Job-Shop Scheduling Problem. In: Charles A. Long, Valeri M. Mladenov und Zoran S. Bojkovic (Hrsg.): Proceedings of the WSEAS International Conferences, Corfu Island, Greece, February 16-19, 2007, S. 76–80.

Eberhart, R. C.; Shi, Y.: Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. In: V. William Porto, N. Saravanan, D. Waagen und A. E. Eiben (Hrsg.): Proceedings 7th International Conference on Evolutionary programming, EP98 San Diego, California, USA, March 25–27, 1998. Berlin/Heidelberg, D: Springer Verlag 1998, S. 611–616.

Gao, H.; Feng, B.; Zhu, L.: An Improved Genetic Algorithm for Flow Shop Sequencing. In: Mingsheng Zhao und Zhongzhi Shi (Hrsg.): Proceedings of 2005 International Conference on Neural Networks and Brain, Beijing, China, October 13-15, 2005, S. 521–524.

Girish, B. S.; Jawahar, N.: Scheduling job shop associated with multiple routings with genetic and ant colony heuristics. In: International Journal of Production Research 47 (2009) 14, S. 3891–3917.

Guo, Y. W.; Li, W. D.; Mileham, A. R.; Owen, G. W. (2009): Optimisation of integrated process planning and scheduling using a particle swarm optimisation approach. In: International Journal of Production Research 47 (2009) 14, S. 3775–3796.

Kennedy, J.; Eberhart, R. C.: Particle swarm optimization. In: Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Western Australia, November 27- December 1 1995. Piscataway, USA, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers 1995, S. 1942–1948.

Lestan, Z.; Brezocnik, M.; Buchmeister, B.; Brezovnik, S.; Balic, J.: Solving the job-shop scheduling problem with a simple genetic algorithm. In: International Journal of Simulation Modelling 8 (2009) 4, S. 197–205.

Logenthiran, T.; Srinivasan, D.: Particle Swarm Optimization for unit commitment problem. In: IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010, Singapore. Piscataway, June 14 - 17 2010, NJ: IEEE 2010, S. 642–647.

März, L.; Krug, W.: Kopplung von Simulation und Optimierung. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose, Gerald Weigert und Lotha März (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin/Heidelberg, D: Springer Verlag 2011, S. 41–45.

Morita, H.; Shio, N. (2005): Hybrid Branch and Bound Method with Genetic Algorithm for Flexible Flowshop Scheduling Problem. In: JSME Int. J., Ser. C 48 (2005) 1, S. 46–52.

Nedeß, C.; Friedewald, A.; Wagner, L.: Simulationsgestützte Optimierung zur Ablauf- und Strukturverbesserung in Produktionsbetrieben. In: Rabe. M. (Hrsg.): Advances in simulation for production and logistics applications. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2008, S. 469–478.

Robinson, S.: Simulation. The practice of model development and use. Chichester, Eng: Wiley 2004.

Solyali, O.; Özpeynirci, Ö.: Operational fixed job scheduling problem under spread time constraints: a branch-and-price algorithm. In: International Journal of Production Research 47 (2009) 7, S. 1877–1893.

Subbaraj, P.; Rengaraj, R.; Salivahanan, S.; Senthilkumar, T. R.: Parallel particle swarm optimization with modified stochastic acceleration factors for solving large scale economic dispatch problem. In: International Journal of Electrical Power & Energy Systems 32 (2010) 9, S. 1014–1023.

Tamilarasi, A.; Anantha kumar, T. (2010): An enhanced genetic algorithm with simulated annealing for job-shop scheduling. In: International Journal of Engineering, Science and Technology 2 (2010) 1, S. 144–151.

Udomsakdigool, A.; Kachitvichyanukul, V. (2008): Multiple colony ant algorithm for job-shop scheduling problem. In: International Journal of Production Research 46 (2008) 15, S. 4155–4175.

VDI 2010 Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth.

Wang, E. J.; Chen, Y. C.; Wang, W. S.; Su, T. S.: Analysis of outsourcing cost-effectiveness using a linear programming model with fuzzy multiple goals. In: International Journal of Production Research 48 (2010) 2, S. 501–523.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulationsbasierte Kapazitätsbedarfsabschätzung in einem Modell der Auftragsfreigabe mit Berücksichtigung von Servicegraden

Simulation based capacity estimation for a model of order release planning under the consideration of service levels

Frederick Lange, Frank Herrmann, HS Regensburg, Regensburg (Germany), frederick.lange@YMail.com, frank.herrmann@hs-regensburg.de

Thorsten Claus, TU Dresden (IHI Zittau), Zittau (Germany), claus@ihi-zittau.de

Abstract: Clearing Functions describe the nonlinear relationship between the orders which are in process and the output in capacitated productions systems under high utilization. These Clearing Function can be derived analytical by using steady-state queuing models or empirical by using simulation. We show how to estimate a Clearing Function for a single-level multi-product production system by using a simulation model. This non-linear Clearing Function is integrated into a model of order release planning. We extend this model to consider the uncertainty of the demand by using a Beta service level. We compare our model with an inventory management policy under different demand conditions.

1 Einführung

In den kommerziell verfügbaren Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS-Systemen) erfolgt eine Dekomposition des Gesamtplanungsproblems in Teilplanungsprobleme. Diese führt in der Regel zu den Modulen der Produktionsprogrammplanung, Materialbedarfsplanung, mit den Kernkomponenten der Nettobedarfsrechnung und der Losgrößenbildung, sowie der Fertigungssteuerung (Herrmann 2011). Zur Abschätzung des zulässigen Kapazitätsbedarfs in der Materialbedarfsplanung, von diesen in der Industrie eingesetzten PPS-Systemen, dient die Durchlaufzeit. Hierbei wird eine feste Durchlaufzeit zur Terminierung von Produktionsaufträgen (Herrmann 2011) verwendet. Messungen der tatsächlichen Durchlaufzeiten zeigen einen nicht linearen Zusammenhang zwischen der Arbeitslast und der Ausbringungsmenge einer Ressource mit beschränkten Kapazitäten. Analytisch lässt sich dies durch die Warteschlangentheorie begründen. Somit hängt die Durchlaufzeit von der Last im

Produktionssystem ab, welche wiederum durch die Zuweisung von Produktionsaufträgen auf die Ressourcen durch das Planungsmodell bedingt wird.

Unterschiedliche Ansätze integrieren diese Abhängigkeiten zwischen der Durchlaufzeit und der Belastung der Ressourcen in Optimierungsmodellen. Beispielsweise relaxiert Spitter et al. (2005) die Verwendung von Durchlaufzeiten und Voss et al. (2003) integriert die Ressourcenbelastung. Eine Iteration zwischen einem Simulations- und Optimierungsmodell erfolgt z.B. in Kim und Kim (2001).

In einem alternativen Ansatz wird der Zusammenhang zwischen der Arbeitslast im Produktionssystem und der zu erwartenden Ausbringungsmenge durch eine nicht lineare Clearing Function beschrieben. Dieser Ansatz wird in diesem Beitrag verfolgt.

2 Literaturübersicht

In Produktionssystemen mit Kapazitätsbeschränkungen existieren nicht lineare Abhängigkeiten zwischen der Arbeitslast im Produktionssystem und der Ausbringungsmenge des Produktionssystems. Viele Autoren beschrieben diese Abhängigkeiten durch eine sogenannte Clearing Function (CF) (Karmarkar 1989; Missbauer 2002; Asmundsson et al. 2009; Ranvindran et al. 2011, Kacar et al. 2012). Eine CF bestimmt die zu erwartende bzw. maximale Ausbringungsmenge über einen definierten Zeithorizont als eine Funktion in Abhängigkeit zur Arbeitslast im Produktionssystem (Missbauer und Uzsoy (2010)). Diese zugrunde gelegte Arbeitslast wird in der Regel durch den Work-In-Process (WIP) – Bestand beschrieben. In der Literatur werden unterschiedliche Arten solcher CF beschrieben (Abb. 1).

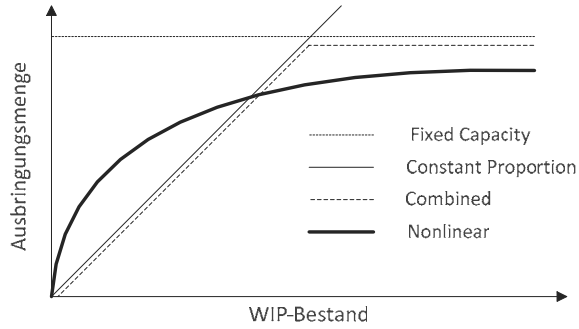


Abbildung 1: *Beispiele für Clearing Functions in der Literatur (in Anlehnung an Kacar et al. (2012))*

Die CF „Fixed Capacity“ beschreibt eine statische maximale Ausbringungsmenge des Produktionssystems ohne Berücksichtigung des WIP-Bestands. Graves (1986) charakterisiert durch die CF „Constant Proportion“ eine zum WIP-Bestand linear steigende Ausbringungsmenge. Hierdurch wird angenommen, dass, unabhängig vom WIP-Bestand, feste Durchlaufzeiten existieren und eine unendliche Ausbringungsmenge möglich ist. Hopp und Spearman (2001) schlagen daher vor, durch eine obere Grenze die maximale Ausbringungsmenge zu beschränken, was

durch die CF „Combined“ beschrieben ist. In den meisten Entscheidungsmodellen wird eine nicht lineare Kapazitätsrestriktion vermieden, sodass diese linearen CF, wie z.B. die „Combined“, Verwendung finden. Einzig die von Karmarkar (1989) beschriebene CF „Nonlinear“ berücksichtigt die nicht linearen Abhängigkeiten zwischen dem WIP-Bestand und der zu erwartenden Ausbringungsmenge der Ressource bzw. des Produktionssystems.

Um eine solche nicht lineare CF zu erhalten, kann diese analytisch über die Warteschlangentheorie abgeleitet werden. So wird in Asmundsson et al. (2009) der WIP-Bestand in einem G|G|1 Wartesystem durch

$$W = \frac{\left(c_a^2 + c_s^2\right)}{2} \cdot \frac{p^2}{\left(1-p\right)} + p \tag{1}$$

bestimmt. Hierbei wird die Auslastung der Station durch p und die Variationskoeffizienten der Ankunfts- bzw. der Bedienzeiten durch c_a^2 und c_s^2 beschrieben. Durch Umformung dieser Gleichung nach p erhält man

$$p = \frac{\sqrt{\left(W+1\right)^2 + 4 \cdot W \cdot \left(c-1\right)} - \left(W+1\right)}{2 \cdot \left(c-1\right)} \quad mit \quad c = \frac{c_a^2 + c_s^2}{2} \tag{2}$$

Asmundsson et al. (2009) schlagen vor, die Auslastung p als Ausbringungsmenge zu interpretieren. Für einen festen Wert von c ist ein degressiver Anstieg der Ausbringungsmenge bei steigendem WIP-Bestand W zu verzeichnen. Einen alternativen analytischen Ansatz beschreiben (Missbauer und Uzsoy 2010). Hierbei wird die erwartete Ausbringungsmenge E(X) in Abhängigkeit zu einem erwartenden WIP-Bestand E(W) durch ein M|G|1 Wartesystem wie folgt bestimmt.

$$E\left(X\right) = C \cdot \frac{E\left(W\right)}{E\left(W\right) + k} \quad mit \quad k = \frac{\mu \cdot \sigma^2}{2} + \frac{1}{2 \cdot \mu} \tag{3}$$

Durch den Parameter C wird hierbei die maximale Kapazität je Periode des Produktionssystems beschrieben. Die Parameter der Verteilungsfunktion der Bearbeitungszeit sind durch den Mittelwert μ und die Streuung σ gegeben.

Bereits in etwas größeren Produktionssystemen treten gegenseitige Beeinflussungen der Ausbringungsmengen zwischen den einzelnen Ressourcen auf, die nicht durch ein einzelnes Warteschlangenmodell, sondern nur durch ein Netzwerk von Warteschlangenmodellen nachgebildet werden können. Sofern diese aufgestellt werden können, dürfte eine Lösung mathematisch sehr aufwendig sein. Alternativ können solche CF auch auf Basis von empirischen Untersuchungen aufgestellt werden. Ein solches Vorgehen ist u.a. in Asmundsson et al. (2009), Kacar und Uzsoy (2010) oder Kacar et al. (2012) beschrieben. Um eine CF zu ermitteln, verwendet Asmundsson et al. (2009) fünf unterschiedliche Bedarfsszenarien und einen Planungshorizont von 70 Perioden. Aus diesen Bedarfsszenarien werden durch das Entscheidungsmodell von Hackman und Leachman (1989), welches feste Durchlaufzeiten verwendet, Produktionspläne erstellt. Für diese unterschiedlichen Bedarfssituationen werden jeweils 50 Simulationsexperimente (m=50) durchgeführt

und die Daten der Ausbringungsmenge $x_{t,s}$ sowie die WIP-Bestände $w_{t,s}$ je Periode t und Simulationslauf s gesammelt. Aus diesen Daten werden die Mittelwerte für einen erwarteten WIP-Bestand $E(W_t)$ sowie eine korrespondierende Ausbringungsmenge $E(X_t)$ je Periode t gebildet. Auf Basis dieser Datenpunkte erfolgt die Bildung der CF indem visuell eine Kurve durch die Datenpunkte gezogen wird (Asmundsson et al. 2009). Hierbei handelt es sich um eine Art Ausgleichsgerade.

3 Fallstudie

In unserer Untersuchung wird ein einstufiges Produktionssystem, bestehend aus acht Produkten und fünf Arbeitsstationen, verwendet. Es erfolgt die Berücksichtigung von deterministischen Stückbearbeitungszeiten. Rüstzeiten werden vernachlässigt. Die Daten sind in der nachstehenden Tabelle 1 aufgeführt. Die Bedarfsmuster der einzelnen Produkte unterscheiden sich hierbei. Dies wird nachfolgen näher beschrieben.

Tabelle 1: *Stückbearbeitungszeiten je Produkt und Arbeitsstation*

Produkt	Arbeitsstationen	Stückbearbeitungszeit
Part01 / Part05	Sägen	40 Sekunden
	Drehen	100 Sekunden
	Fräsen	100 Sekunden
	Schleifen	40 Sekunden
Part02 / Part06	Drehen	150 Sekunden
	Fräsen	100 Sekunden
	Waschen	100 Sekunden
	Schleifen	50 Sekunden
Part03 / Part07	Fräsen	90 Sekunden
	Waschen	80 Sekunden
	Schleifen	100 Sekunden
Part04 / Part08	Drehen	30 Sekunden
	Schleifen	30 Sekunden

Die Länge einer Periode t ist mit 24 Stunden definiert, die verfügbare Kapazität je Periode und Ressource beträgt ebenfalls 24 Stunden

4 Ermittlung einer Clearing Function

Ziel ist es, eine Funktion zu ermitteln, welche zu einem produktspezifischen WIP-Bestand W_k eine zu erwartende Ausbringungsmenge X_k bestimmt ($1 \leq k \leq 8$). Durch Simulation wird die mittlere Ausbringungsmenge des Produktionssystems unter einen im Zeitverlauf konstanten WIP-Bestand gemessen. Um statistisch signifikante Kennzahlen zu erhalten, wird über einen langen Simulationshorizont von 1000 Perioden gemessen. Zu Beginn einer Periode t ($1 \leq t \leq 1000$) wird für jedes Produkt k ($1 \leq k \leq 8$) die Freigabemenge bestimmt, um einen definierten Ziel-WIP-Bestand

zu erreichen. Hierzu wird die im System befindliche Arbeitslast $\hat{W}_{k,t}$ je Produkt, welche sich zu Beginn von Periode t im System befindet, ermittelt. Diese ist definiert durch die Freigabemenge $R_{k,t-1}$, welche zu Beginn der Vorperiode in das Produktionssystem freigegeben wurde, multipliziert mit der kumulierten Stückbearbeitungszeit tb_k^{kum}, abzüglich der in der Vorperiode erbrachten Arbeitsleistung $\lambda_{k,t-1}$. Die erbrachte Arbeitsleistung $\lambda_{k,t}$ beschreibt hierbei die in Periode t geleistete Arbeit in Zeiteinheiten. Es ist zu beachten, dass die Arbeitslast auch unfertige Arbeitsgänge beinhaltet, d.h. Arbeitsgänge, welche zum Periodenende nicht beendet worden sind, werden anteilig berücksichtigt. Es gilt:

$$\hat{W}_{k,t} = R_{k,t-1} \cdot tb_k^{kum} - \lambda_{k,t-1} \qquad \forall\, 1 \le k \le K \;\wedge\; 1 \le t \le T \tag{4}$$

Aus dieser zu Beginn einer Periode t im Produktionssystem befindlichen Arbeitslast $\hat{W}_{k,t}$ kann die Freigabemenge $R_{k,t}$ ermittelt werden um den Ziel-WIP-Bestand $W_{k,Ziel}$ zu erreichen. Es ist zu beachten, dass $\hat{W}_{k,t}$ die Arbeitslast in Zeiteinheiten beschreibt, aber der Ziel-WIP-Bestand den WIP-Bestand eines Produktes k in Mengeneinheiten (ME) beschreibt. Somit ist die Arbeitslast in Stückeinheiten umzurechnen. Die Freigabemenge $R_{k,t}$, welche zu Beginn einer Periode t von Produkt k freizugeben ist, ergibt sich aus:

$$R_{k,t} = W_{k,Ziel} - \frac{\hat{W}_{k,t}}{tb_k^{kum}} \qquad \forall\; 1 \le k \le K \;\wedge\; 1 \le t \le T \tag{5}$$

Zu Beginn einer jeden Periode t für jedes Produkt k ist ein vorab definierter Ziel-WIP-Bestand in ME im Produktionssystem vorhanden. Dieser setzt sich aus den im Produktionssystem befindlichen Auftragsmengen sowie den Freigabemengen zusammen. Der Ziel-WIP-Bestand $W_{k,Ziel}$ wird für jede Periode t und Produkt k über eine Normalverteilung mit einem im Simulationsexperiment konstanten Mittelwert $\mu_{ZielWIP}$ sowie einer Streuung $\sigma_{ZielWIP}$ ermittelt. Die Streuung ist durch einen Variationskoeffizienten von 0,3 definiert. Dieser Variationskoeffizient korrespondiert mit dem der Auftragsmengen der Bedarfe. Für ein spezifisches Produkt k* erfolgt die Messung der CF in einem separaten Simulationsexperiment. Somit ist zu Beginn jeder Periode t von Produkt k* exakt der definierte Ziel-WIP-Bestand und von den übrigen Produkten im Mittel der definierte Ziel-WIP-Bestand im Produktionssystem vorhanden. Die Mittelwerte der Ziel-WIP-Bestände $\mu_{ZielWIP}$ werden schrittweise von 1 – 500 erhöht. Gemessen wird die mittlere Ausbringungsmenge von Produkt k* über den Simulationshorizont. Hierzu wird am Ende jeder Periode die Ausbringungsmenge $X_{k^*,t}$ gemessen. Aus diesen Messwerten wird eine mittlere Ausbringungsmenge für einen definierten WIP-Bestand errechnet.

5 Modell zur Auftragsfreigabe

Das von Ravindran et al. (2011) beschriebene Entscheidungsmodell zur Auftragsfreigabe wurde um die Berücksichtigung von mehreren Produkten sowie für den Einsatz in eine rollierende Planungsumgebung erweitert. Auf Basis dieses

erweiterten Modells konnten bereits für einen wiederbeschaffungszeitbezogenen Alpha-Servicegrad vielversprechende Ergebnisse erzielt werden (siehe Lange et al. 2013). In dieses Modell wird nun ein Beta-Servicegrad integriert. Eine Beschreibung des Entscheidungsmodells ist nachfolgend aufgeführt (der Erwartungswert einer Variablen x wird durch E(x) beschrieben).

- Parameter:

$CF_k\left(W_{k,t-1}\right)$: Produktspezifische CF zur Bestimmung der Ausbringungsmenge.

$E\left(D_k\right)$: Mittelwert der Bedarfe für Produkt k in Periode t. Kleinster Wert: $D_{k,\min}$.

h_k: Lagerkostensatz für Produkt k.

- Entscheidungsvariablen:

$F_{k,t}$: Fehlmengen von Produkt k in Periode t. Initiale Fehlmengen: $F_{k,0}$.

$I_{k,t}$: Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t. Initialbestand: $I_{k,0}$.

$R_{k,t}$: Freigabemenge von Produkt k zu Beginn von Periode t.

$X_{k,t}$: Produktionsmenge von Produkt k in Periode t, welche in t verfügbar ist.

$W_{k,t}$: WIP-Bestand von Produkt k am Ende von Periode t. Initialbestand: $W_{k,0}$.

$Y_{k,t}$: Hilfsvariable für Produkt k zur Ermittlung der Freigabemenge $R_{k,t}$.

- Zielfunktion

$$Minimiere \;\; Z = \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T}\left(h_k \cdot \left(E\left(I_{k,t}\right) + E\left(W_{k,t}\right)\right)\right) \tag{6}$$

- Lagerbilanzgleichung

$$E\left(I_{k,t}\right) = \left(I_{k,0} - F_{k,0}\right) + \sum_{i=1}^{t} E\left(X_{k,i}\right) - \sum_{i=1}^{t} E\left(D_{k,i}\right) + \sum_{i=1}^{t} E\left(F_{k,i}\right) \tag{7}$$

- WIP-Bestand

$$E\left(W_{k,t}\right) = W_{k,0} + \sum_{i=1}^{t}\left(Y_{k,i} + E\left(D_{k,i}\right) - E\left(X_{k,i}\right)\right) \tag{8}$$

- Servicegradrestriktion

$$\begin{aligned} &\left(\left(I_{k,0} - F_{k,0}\right) + W_{k,0}\right) + \sum_{i=1}^{t} Y_{k,i} \geq E\left(D_{k,t}\right) + \Phi^{1}_{N(0,1)}\left(v_{k,t}\right) \cdot \sigma\left(D_{k,t}\right) \\ &mit \;\; v_{k,t} = \frac{\left(1-\beta\right)\cdot q_{k,t}}{\sigma\left(D_{k,t}\right)} \wedge \;\; q_{k,t} = E\left(D_{k,t}\right) + \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^{t} Y_{k,t} \end{aligned} \tag{9}$$

- Kapazitätsrestriktion

$$E\left(X_{k,t}\right) \leq CF_k\left(W_{k,t-1}\right) \tag{10}$$

- Nicht-Negativitätsbedingung

$$\begin{aligned} &Y_{k,t} + D_{k,\min} \geq 0 \\ &E\left(I_{k,t}\right), E\left(W_{k,t}\right), E\left(X_{k,t}\right), E\left(F_{k,t}\right) \geq 0 \end{aligned} \tag{11}$$

Durch die Zielfunktion (6) erfolgt die Minimierung der Gesamtkosten für die Endproduktlager- sowie WIP-Bestände. Durch die Lagerbilanzgleichung (7) wird der Bestand an Endprodukten zum Ende einer Periode t ermittelt. Die auftretenden Fehlmengen werden hierbei explizit ausgewiesen. Über die Gleichung zum WIP-Bestand (8) erfolgt die Ermittlung der am Ende einer Periode t vorhandener WIP-Bestände. Auftretende Fehlmengen werden über die Servicegradrestriktion (9) reguliert. Hierdurch werden die notwendigen Bestandsänderungen $Y_{k,t}$ je Produkt k und Periode t ermittelt, sodass der Bestellbestand nicht unterschritten wird. Zur Berechnung des Bestellbestandes wird als Los $q_{k,t}$ der Erwartungswert der Bedarfe für ein Produkt k in Periode t, zuzüglich der mittleren Bestandsänderungen $Y_{k,t}$ der Vergangenheitswerte verwendet. Die ermittelte CF wird in der Kapazitätsrestriktion (10) verwendet. Diese beschreibt für einen definierten WIP-Bestand die zu erwartende Ausbringungsmenge.

Durch das Entscheidungsmodell werden die Bestandsänderungen $Y_{k,t}$ ermittelt. Auf Basis dieser Werte und dem in der Vorperiode tatsächlich eingetretenen Bedarfsmenge werden die Freigabemengen berechnet: $R_{k,t} = Y_{k,t-1} + D_{k,t-1}$.

6 Experimente

Durch Simulationsexperimente soll die Leistungsfähigkeit des oben beschriebenen Entscheidungsmodells untersucht werden. Hierfür wird das Modell mit einer Basestock-Politik verglichen. Durch Langzeitsimulationen über 1000 Perioden wird die statistische Signifikanz der Kennzahlen sichergestellt. Nachfolgend werden die Erzeugung der unterschiedlichen Bedarfsszenarien, das Vergleichsmodell sowie die erzielten Ergebnisse beschrieben.

6.1 Erzeugung der Bedarfsszenarien

Die Bedarfe aller Produkte sind normalverteilt sowie in jeder Periode stochastisch unabhängig. Die im Mittel auftretenden Bedarfsmengen im Simulationshorizont ist über alle Produkte identisch, d.h. im Mittel wird von jedem Produkt die gleiche Menge benötigt und somit produziert. Die Mittelwerte $\mu_{k,t}$ und Standardabweichungen $\sigma_{k,t}$ je Produkt k und Periode t können variieren, wobei $\sigma_{k,t}$ durch einen Variationskoeffizienten von 0,3 bestimmt werden.

Um eine Variation der Auftragsmengen zu schaffen, werden die Mittelwerte je Produkt im Zeitverlauf variiert. Dies erfolgt in Anlehnung an Ravindran et al. (2011) über zwei Steuergrößen. Zum einen wird über eine Gleichverteilung, mit einer unteren Schranke $\delta_{\min}$ sowie einer oberen Schranke $\delta_{\max}$, der Parameter Δ_n bestimmt.

Dieser gibt an, in welchen Abständen eine Änderung der Mittelwerte erfolgt. Es gilt: $\Delta_n = U\left(\delta_{\min}, \delta_{\max}\right)$. Der neue Mittelwert μ_n wird ebenfalls über eine Gleichverteilung mit einer unteren Schranke $\rho_{\min}$ sowie einer oberen Schranke $\rho_{\max}$ ermittelt, also durch: $\mu_n = U\left(\rho_{\min}, \rho_{\max}\right)$. Auf Basis dieser Steuergrößen Δ_n und μ_n können für den gesamten Simulationshorizont T Mittelwerte erzeugt werden. Sind die Mittelwerte je Periode generiert, so erfolgt die Erstellung von tatsächlichen Auftragsmengen je Produkt und Periode über eine Normalverteilung und zwar über das oben dargestellte Verfahren. Insgesamt werden zwei unterschiedliche Bedarfsszenarien betrachtet, die sich in der Höhe der Schwankungen der Auftragsmengen unterscheiden. Die Mittelwerte und Streuungen je Produkt und Szenario, die in den Simulationsuntersuchungen tatsächlich auftraten, sind in der nachstehenden Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: *Mittelwerte und Streuungen je Produkt und Bedarfsszenario*

Produkt	Part01	Part02	Part03	Part04	Part05	Part06	Part07	Part08
Szenario I: $\Delta_n = U\left(3,12\right)$; $\mu_n = U\left(60,90\right)$								
Mittelwert	75,82	75,30	75,35	73,96	75,27	74,53	74,30	75,08
Streuung	25,33	23,48	23,86	24,58	24,26	23,26	25,26	24,50
Szenario II: $\Delta_n = U\left(3,12\right)$; $\mu_n = U\left(50,100\right)$								
Mittelwert	75,46	74,74	75,44	75,41	74,76	74,69	75,19	76,60
Streuung	27,78	26,94	27,96	26,96	27,15	27,92	26,83	27,63

6.2 Vergleichsmodell

Um die Leistungsfähigkeit des Entscheidungsmodells bewerten zu können, wird dieses mit einer Basestock-Politik verglichen. Der Mittelwert der Auftragsmengen über den gesamten Horizont von Produkt k ist die Losgröße q_k. Somit kann für einen definierten Beta-Servicegrad der Bestellbestand s_k wie folgt berechnet werden; s. z.B. Herrmann (2011).

$$s_k = E\left(Y_k^*\right) + v_k \cdot \sigma\left(Y_k^*\right) \quad mit \quad \Phi^1_{N\left(E\left(Y_k^*\right),\sigma^2\left(Y_k^*\right)\right)}\left(v_k\right) = \frac{\left(1-\beta\right)\cdot q_k}{\sigma\left(Y_k^*\right)} \tag{12}$$

Eine detaillierte Berechnung der Nachfragemengen im Wiederbeschaffungszeitraum ist z.B. in Herrmann (2011) beschrieben. Es liegt eine Wiederbeschaffungszeit von einer Periode vor, sodass analog zum Entscheidungsmodell i.d.R. in jeder Periode eine Bestellentscheidung getroffen wird.

6.3 Ergebnisse

Durch Simulationsexperimente wird die Leistungsfähigkeit des Entscheidungsmodells mit dem der Basestock-Politik verglichen. Als Kenngrößen werden neben dem erzielten Beta-Servicegrad auch der Mittelwert und die Streuung der Lagerbestände über alle Perioden und Produkte herangezogen. In der

nachstehenden Tabelle 3 sind die Ergebnisse für einen angestrebten Beta-Servicegrad von 95% dargestellt.

Tabelle 3: *Ergebnisse für einen Beta-Servicegrad von 95%*

Angestrebter Beta-Servicegrad von 95%					
Model	Servicegrad		Lagerbestand		Szenario
	Mittelwert	Streuung	Mittelwert	Streuung	
LP-Model	95,22	0,47	42,95	34,64	S – I
Basestock	93,36	0,70	42,73	31,80	S – I
LP-Model	94,81	0,69	44,87	35,28	S – II
Basestock	92,29	1,12	43,37	31,61	S – II

Die Ergebnisse zeigen, dass durch das Entscheidungsmodell der Servicegrad nahezu erreicht werden kann. Die Basestock-Politik verfehlt den Servicegrad um teilweise über 2 Prozentpunkte. Insbesondere die Streuung der Servicegrade konnte deutlich reduziert werden, sodass die Schwankungen der Servicegrade der einzelnen Produkte geringer sind. Die Lagerbestände im LP-Modell sind geringfügig höher.

Die Untersuchung wurde auch für einen zu erreichenden Beta-Servicegrad von 90% durchgeführt. Nachfolgende Tabelle 4 zeigt die erzielten Ergebnisse. Der Vorteil durch unseren Ansatz ist noch deutlicher. Wie aus der Literatur bekannt (siehe z.B. Herrmann (2011)), steigen bei einem höheren Servicegrad die Bestände an. Im vorliegenden Modell existiert keine Auslieferung von Teilmengen. So erfolgt die Bedarfsdeckung und somit die Auslieferung erst, wenn der gesamte Bedarf durch den Lagerbestand gedeckt wird. Bei einem geringeren Servicegrad steigt die Anzahl der Auftragsrückstände an, was somit zu einer Erhöhung der Lagerbestände führt.

Tabelle 4: *Ergebnisse für einen Beta-Servicegrad von 90%*

Angestrebter Beta-Servicegrad von 90%					
Model	Servicegrad		Lagerbestand		Szenario
	Mittelwert	Streuung	Mittelwert	Streuung	
LP-Model	90,66	0,56	46,30	34,41	S – I
Basestock	86,29	2,68	45,28	29,61	S – I
LP-Model	90,61	0,62	47,05	35,06	S – II
Basestock	86,31	2,72	45,71	30,04	S – II

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt, wie eine produktspezifische CF in einem Produktionssystem mit beschränkten Kapazitäten ermittelt werden kann. Das von Ravindran et al. (2011) beschriebene Modell zur Auftragsfreigabe wurde durch uns erweitert und mit

einem Modell aus dem Bestandsmanagement verglichen. Verbesserungen konnten erzielt werden.

Die Güte einer CF zur Abschätzung von Kapazitätsbedarfen ist weiter zu untersuchen und ihr Einsatz in weiteren Planungsaufgaben zu evaluieren.

Literatur

Assumdsson, J.; Rardrin, R.; Turkseven, C.; Uzsoy, R.: Production planning models with resources subject to congestion. Naval Research Logistics 56 (2009) 2, S. 142-157.

Graves, D.: A tactical planning model for a job shop. Operations Research 34 (1986), S. 552-533.

Hackman, S.; Leachman, R.: A general framework for modeling production. Management Science 35 (1989) 4, S. 478-495.

Herrmann, F.: Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und –steuerung. Wiesbaden: Vieweg & Teubner 2011.

Kacar, N.; Irdem, D.; Uzsoy, R.: An Experimental Comparison of Production Planning Using Clearing Functions and Iterative Linear Programming-Simulation Algorithm. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 25 (2012), S. 104-107.

Kacar, N.; Uzsoy, R.: Estimating Clearing functions from simulation data. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (2010), S. 1699-1710.

Karmarkar, U. Capacity loading and release planning with Work-in-Progress (WIP) and Leadtimes. Journal of Manufacturing and Operations Management 2 (1989), S. 105-123.

Kim, B.; Kim, S.: Extended model for a hybrid production planning approach. International Journal of Production Economics 73 (2001), S. 165-173.

Lange, F.; Herrmann, F.; Claus, T.: Simulation Based Clearing Functions for a Model of Order Release Planning. Proceedings of the European Conference On Modelling And Simulation (2013), in Press.

Missbauer, H.: Aggregate order release planning for time-varying demand. International Journal of Production Research 40 (2002), S. 688-718.

Missbauer, H.; Uzsoy, R.: Optimization Models of Production Planning Problems. In: Kempf, G. et al. (Hrsg.): Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise. International Series in Operations Research & Management, Springer Science+Business Media (2011), 173-208.

Ravindran, A.; Kempf, K.; Uzsoy, R.: Production planning with load-dependent lead times and safety stocks for a single product. International Journal of Planning and Scheduling 1 (2011) 1, S. 58-89.

Spitter, J.; Hurkens, C.; de Kok, A.; Lenstra, J.; Negenman, E.: Linear programming models with planned lead times for supply chain operations planning. European Journal of Operational Research 163 (2005), S. 706-720.

Voss, S.; Woodruff, D.: Introdurction to Computational optimization Models for Production Planning in a Supply Chain. Berlin: Springer 2003.

Zhang, X.; Prajapati, M.; Peden, E.: A stochastic production planning model under uncertain seasonal demand and market growth. International Journal of Production Research 49 (2011) 7, S. 1957-1975.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulationsbasiertes Assistenzsystem zur Bewertung, Auswahl und Konfiguration von PPS-Methoden für mittelständische Produktionsdienstleister – Anforderungen, Systemkonzeption und Anwendungsperspektiven

Simulation-based assistance system for evaluation, selection and configuration of production planning and control methods for medium-sized production service providers – requirements, system conception and aspects of application

Christoph Brodhun, Enrico Teich, Thorsten Claus, Internationales Hochschulinstitut (IHI) Zittau – Eine Zentrale Einrichtung der Technischen Universität (TU) Dresden, Zittau (Germany), brodhun@ihi-zittau.de, eteich@ihi-zittau.de, claus@ihi-zittau.de

Abstract: Medium-sized production service providers have production performances, which can combined with services, like distribution or development processes, available for their customers. This business model comes to specific challenges in production planning and control. In particular for overcoming the uncertainties of determination the primary requirements, appropriate methods are needed. In this article the conceptual structure and the aspects of application of a simulation-based assistance system, which enables systematic and valid evaluation, selection and also configuration of this methods, are described. At that point, specific system requirements, like the development of a simulation model, which is representative for medium-sized production service providers, and also scenario creation using scenario technique, are considered.

1 Rahmenbedingungen und Motivation

Der einstige Trend zur Auslagerung der Fertigung von Original Equipment Manufacturers (OEM) an *Produktionsdienstleister* (PDL) gehört mittlerweile zum Industriestandard in der Elektronikbranche und setzt sich auch in vielen anderen Branchen, wie etwa im Automobilbau, rasant fort. PDL besitzen kein fixes Produktsortiment, sondern halten vielmehr Produktionsleistungen in einer hohen Variantenzahl, die mit produktionsnahen Serviceleistungen zu hybriden Leistungsbündeln verschmolzen werden, für ihre Kunden bereit. (vgl. u. a. Sturgeon 2002, Chung et al. 2004 und Hürtgen 2009) Das Produktionsumfeld der PDL – insbesondere der mittelständischen PDL, die hier im Fokus der Betrachtung stehen – wird aufgrund der

marktseitigen Flexibilitätserwartungen durch hohe quantitative, qualitative und zeitliche Nachfrageunsicherheiten, welche sich vor allem in Form von stark ausgeprägten Belastungsschwankungen in der Produktion niederschlagen, charakterisiert. Abbildung 1 verdeutlicht diese Belastungsschwankungen exemplarisch anhand von Primärbedarfsdaten eines ausgewählten Referenzunternehmens.

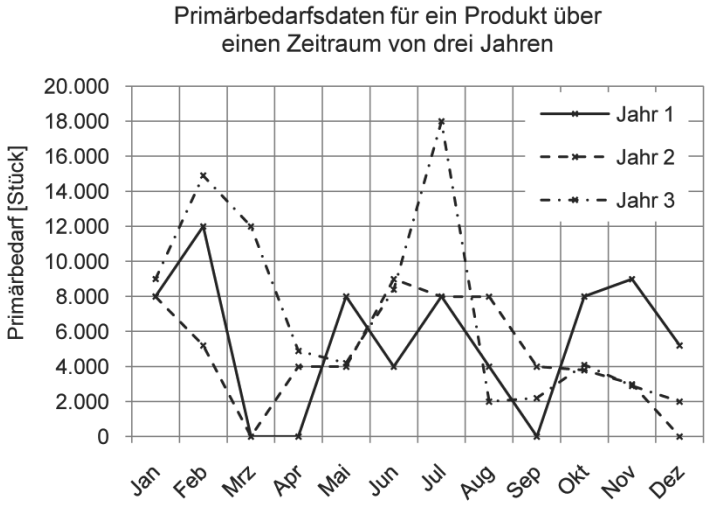


Abbildung 1: *Primärbedarfsanalyse (Belastungsschwankungen)*

Der schwankende Primärbedarfsverlauf macht das Erkennen von wiederkehrenden Bedarfsmustern nahezu unmöglich. Da aber vor allem die Primärbedarfsdaten eine wichtige Planungsgrundlage für die *Produktionsplanung und -steuerung* (PPS) darstellen, erwachsen hieraus besondere Herausforderungen, welche es durch die geeignete methodische Gestaltung der PPS zu bewältigen gilt. Abbildung 2 macht am Beispiel einer Analyse zur Liefertermintreue deutlich, welche Konsequenzen zu erwarten sind, wenn die methodische Gestaltung der PPS nicht im ausreichenden Maße gelingt. Auch diese Untersuchung wurde bei einem ausgewählten Referenzunternehmen durchgeführt. Die im größeren Umfang auftretenden Lieferterminverfehlungen gefährden die Unternehmensexistenz der mittelständischen PDL massiv, da die Sicherstellung einer hohen Liefertermintreue zu den elementaren Anforderungen gehört, die Kunden an diesem Unternehmenstyp stellen (vgl. u. a. Syska 2001, Hürtgen 2009).

Neben den starken Belastungsschwankungen existieren weitere unternehmenstypspezifische Merkmale, welche die Auswahl und Konfiguration geeigneter PPS-Methoden erschweren. So führt der hohe Kundeneinfluss hinsichtlich der Produktspezifikation häufig zu auftragsspezifischen Änderungsbedarfen, die ein mittelständischer PDL im Herstellungsprozess umzusetzen hat. Aus diesen Änderungsbedarfen resultieren, neben konstruktiven, insbesondere logistische Herausforderungen (z. B. aufgrund der Veränderung von Stücklisten und Arbeitsplänen), denen in der PPS geeignet entgegnet werden muss. Als besonders problematisch sind auch pro-

jektartige Einzelaufträge von Schlüsselkunden anzusehen, die bei mittelständischen PDLs unregelmäßig auftreten und kurzfristig eingeplant werden müssen. Häufig ist hier zu beobachten, dass diese Aufträge über die *Chefebene* sofort – ohne Anwendung problemadäquater Planungs- und Steuerungsmethoden – als Fertigungsaufträge in die Produktion eingehen und dadurch in bereits konsolidierte Produktionspläne eingegriffen wird. Die damit einhergehende Zurückstellung anderer Fertigungsaufträge führt zu einer Verlängerung der Durchlaufzeiten und somit wiederum zu Lieferterminverfehlungen (vgl. Abb. 2).

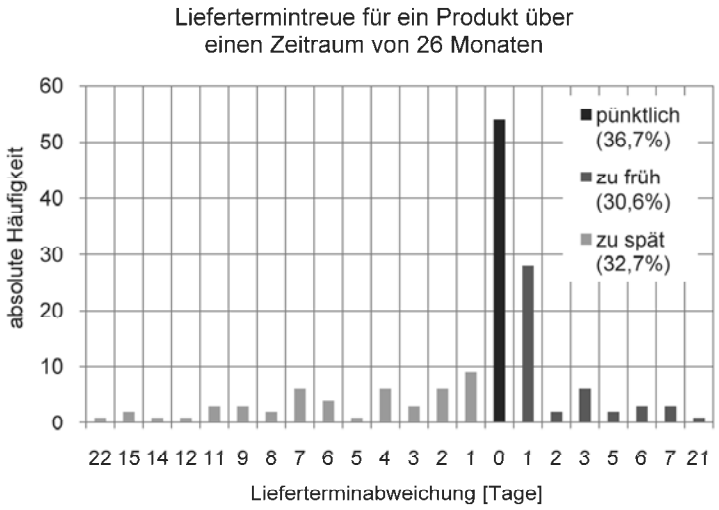


Abbildung 2: *Analyse der Liefertermintreue*

Aus den skizzierten Problembereichen der mittelständischen PDL lässt sich folgende Forschungsfrage ableiten: Wie kann eine systematische und fundierte Bewertung, Auswahl und Konfiguration von PPS-Methoden unter Berücksichtigung der unternehmenstypspezifischen Merkmale der mittelständischen PDL erfolgen? Als Antwort auf diese Fragestellung drängt sich, im Vergleich zu analytischen Verfahren, eine simulationsbasierte Vorgehensweise auf, da sich insbesondere die geschilderte Stochastik der PPS-Rahmenbedingungen geeignet in Simulationsmodellen abbilden lässt. Dies wurde grundlegend bereits in der Forschung nachgewiesen (vgl. Abschn. 2). Forschungsarbeiten, welche die besonderen Spezifika der mittelständischen PDL ganzheitlich und systematisch berücksichtigen, existieren gegenwärtig allerdings noch nicht. Die Zielsetzung der Forschungsarbeit ist demnach die Entwicklung eines *simulationsbasierten Assistenzsystems* zur Bewertung, Auswahl und Konfiguration von PPS-Methoden für mittelständische PDL.

In den folgenden Ausführungen werden sowohl die Systemkonzeption als auch Anwendungsperspektiven dieses Assistenzsystems unter Berücksichtigung der geschilderten Rahmenbedingungen beschrieben.

2 Anforderungen und Systemkonzeption

Die Bewertung, Auswahl und Konfiguration von PPS-Methoden mit Hilfe simulationsbasierter Assistenzsysteme kommt sowohl in der Wissenschaft als auch Industrie zur Anwendung (vgl. u. a. Scholtissek 1996, Werner 2001 und Lanza et al. 2010). Den Kern derartiger Assistenzsysteme bildet stets ein *Simulationsmodell*, welches das Verhalten der Produktionssysteme und den Produktionsablauf einer realen Produktionsumgebung imitiert. Diese Imitation basiert in der Regel auf dem Ansatz der ereignisdiskreten Simulation (discrete event simulation, DES). Das heißt, Zustandsveränderungen im Simulationsmodell werden durch das Eintreten definierter Ereignisse (z.B. Ankunft eines Fertigungsauftrages) an diskreten Zeitpunkten ausgelöst (vgl. zur Klassifikation von Simulationsmodellen u. a. Law 2007; Rose und März 2011). Auch das Simulationsmodell des in diesem Beitrag betrachteten Assistenzsystems nutzt den DES-Ansatz. Dieses Modell soll die Produktion und die damit verbundenen Prozesse eines mittelständischen PDL abbilden. Bei der Auswahl des zu modellierenden Realsystems galt es insbesondere die Anforderung zu erfüllen, dass Erkenntnisse zur Einsatzeignung und Konfiguration von PPS-Methoden, welche aus der Anwendung des Assistenzsystems resultieren, Allgemeingültigkeit für mittelständische PDL besitzen sollen. Die ersten Forschungsbemühungen fokussierten sich demnach auf die Charakterisierung und Abgrenzung dieses Unternehmenstyps, da hier eine Forschungslücke bestand. Die Ausführungen aus Abschnitt 1 ergänzend, werden nachstehend wesentliche unternehmenstypspezifische Merkmale aufgeführt. Für eine ausführliche Betrachtung diesbezüglich sei auf Brodhun (2012) verwiesen.

Mittelständische PDL fertigen zumeist geringteilige variantenreiche Erzeugnisse auf Kundenbestellungen, welche in Form von Einzelaufträgen oder Rahmenaufträgen auftreten. Hinsichtlich der Fertigungsart wird dieser Unternehmenstyp durch Serienfertigung charakterisiert, wobei hierzu auch Einzel- und Kleinserien zu zählen sind. Die Ablaufart wird vor allem durch Werkstatt- und teilweise auch Inselfertigung mit geringen bis mittleren Strukturierungsgrad geprägt. Eine Bevorratung von Bedarfspositionen ist aufgrund der Variantenvielfalt und Kundenorientierung nur auf unteren Strukturebenen möglich. Die Bevorratung von Fertigerzeugnissen stellt eher die Ausnahme dar. Vor allem der hohe Kundeneinfluss bei der Auftragsanbahnung, welcher sich aus dem Geschäftsmodell – dem Vorhalten von Produktionsleistungen in einer hohen Variantenzahl, die mit produktionsnahen Serviceleistungen zu hybriden Leistungsbündeln kundenspezifisch kombiniert werden können – ergibt, stellt ein signifikantes Merkmal dieses Unternehmenstyps dar.

Unter Berücksichtigung dieser Merkmale wurde ein *Referenz- bzw. Stellvertreterunternehmen* – ein typischer mittelständischer PDL – als Modellierungsobjekt ausgewählt. In Kooperation mit der mittleren Managementebene als auch Mitarbeitern aus der Fertigung und angrenzenden Funktionsbereichen dieses Unternehmens konnte im Rahmen mehrerer Workshops die erforderliche Simulationsdatenbasis erarbeitet werden. Daten, welche die strukturellen Eigenschaften der betrachteten Produktion (z. B. Anordnung und grundlegendes Leistungsspektrum der Betriebsmittel) beschreiben, ließen sich durch Sekundärbedarfsdatenerhebungen im Referenzunternehmen aus den vorhandenen Dokumenten mit vertretbarem Aufwand gewinnen. Problematisch gestaltete sich hingegen die Erhebung der produktspezifischen Eigenschaften (z. B. Stücklisten und Arbeitspläne), da – wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt wurde – kein fixes Produktsortiment bei diesem Unternehmens-

typ existiert. Um diese Problemlage zu bewältigen, wurden unternehmenstypische *Referenz- bzw. Stellvertreterprodukte*, deren Herstellung das Leistungsportfolio der Produktion möglichst umfassend in Anspruch nimmt, definiert und charakterisiert. Ähnlich diffizil vollzog sich auch die Erfassung der prozessabhängigen Daten (z. B. Maschinenbelegungszeiten und -verfügbarkeiten), da dafür geeignete Instrumente (z. B. Methoden der Betriebs- oder Maschinendatenerfassung) beim Referenzunternehmen zum Untersuchungszeitpunkt nur rudimentär zum Einsatz kamen und deshalb hier eine unzureichende Ausgangsdatenlage zu verzeichnen war. Folglich mussten geeignete Instrumente im Unternehmen weiterentwickelt und im Rahmen von Primärbedarfsdatenerhebungen zur Anwendung gebracht werden. Um den Entwicklungsaufwand diesbezüglich möglichst gering zu halten, lag der Fokus vorrangig auf der manuellen Betriebsdatenerfassung (BDE). Bei der Festlegung des erforderlichen Datenumfangs, sowie der Erfassung und Aufbereitung dieser Daten, wurde sich insbesondere an der VDI 3633 Blatt 1, Law (2007) als auch Bracht et al. (2011) orientiert. Eine unternehmenstypspezifische Besonderheit, die es bei der Erarbeitung der Simulationsdatenbasis respektive der Erstellung des Simulationsmodells zu beachten galt, war die Berücksichtigung von produktionsnahen Serviceleistungen. So führt das Referenzunternehmen etwa zur Realisierung einer Just-in-Sequence-Strategie (JIS) im Sinne des Kunden (zumeist OEM) eine Sortierung der gefertigten Komponenten vor deren Auslieferung durch.

Neben Daten, welche die Topologie und Struktur der Produktionssysteme charakterisieren, galt es vor allem auch systemlastbeschreibende Daten zu erheben. Die Systemlast resultiert dabei aus eintreffenden Kundenaufträgen, welche wiederum Primärbedarfe ergeben, die durch Fertigungsaufträge befriedigt werden. In Abschnitt 1 wurden bereits die Unsicherheiten geschildert, welche hinsichtlich der Primärbedarfsermittlung bei mittelständischen PDL existieren. Die Anforderung bei der Konzeption und Entwicklung des Assistenzsystems besteht hier demnach in der realitätsnahen Modellierung dieser Unsicherheiten, die sowohl qualitative (Welches Produkt ist zu fertigen?), quantitative (In welcher Menge ist das Produkt zu fertigen?) als auch zeitliche (Wann ist das Produkt zu fertigen?) Ausprägungen implizieren. Insbesondere die *Szenariosimulation* stellt in diesem Zusammenhang einen geeigneten Modellierungsansatz dar (vgl. u. a. Scholl 2001; Lödding et al. 2010). Ein Szenario repräsentiert dabei das Eintreten potentieller zukünftiger Kundenaufträge respektive Primärbedarfe für alle möglichen Produktvarianten im Zeitverlauf. Die Unsicherheit wird durch die Generierung einer Vielzahl solcher möglichen Szenarien abgebildet. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten dieser Szenarien ergeben in Summe eins. Durch die Nutzung der Szenarien als Eingangsdaten für Simulationsuntersuchungen, lässt sich die Reaktion der modellierten Produktionsumgebung und somit die Wirkung der im Simulationsmodell implementierten PPS-Methoden unter verschiedenen Rahmenbedingungen feststellen und hinsichtlich der Ausprägung definierter Zielgrößen (z.B. Auslastung der Produktionskapazitäten, Durchlaufzeiten oder Liefertermintreue) bewerten. Die Durchführung von Simulationsexperimenten unter Einsatz unterschiedlicher PPS-Methoden bzw. Variation der Methodenkonfigurationen ermöglicht deren vergleichende Bewertung und Auswahl. Erstellen lassen sich die Szenarien mit Hilfe von Pseudozufallszahlengeneratoren (vgl. hierzu weiterführend u. a. Domschke und Drexel 2011; Klein und Scholl 2011). Diese Art der Szenariengenerierung setzt allerdings zunächst voraus, dass sich der stochastische Verlauf (Wahrscheinlichkeitsfunktion) der Primärbedarfe (diskrete Zufallszah-

len) auf Basis von Zeitreihen empirisch ermitteln lässt. Des Weiteren sollte diese ermittelte empirische Verteilung auch für zukünftige Primärbedarfsentwicklungen Gültigkeit besitzen. Im Kontext von Prognoseverfahren wird diese Prämisse auch als *Zeitstabilitätshypothese* diskutiert (vgl. u. a. Wild 1974). Untersuchungen von Primärbedarfszeitreihen der definierten Referenzprodukte haben ergeben, dass diese Anforderungen nicht erfüllt werden können. Das heißt, die Verteilung der Beobachtungswerte zeigt, dass die Primärbedarfswerte unregelmäßig und überwiegend nur einmalig im Beobachtungszeitraum aufgetreten sind. Des Weiteren ist die Verteilung der Werte durch eine hohe Streuung gekennzeichnet. Es ist folglich die Vermutung anzustellen, dass sich eine belastbare Wahrscheinlichkeitsfunktion für das Auftreten der Primärbedarfe nicht (mit vertretbarem Aufwand) ermitteln lässt. In Abbildung 3 wird diese Problemlage am Beispiel eines ausgewählten Referenzproduktes veranschaulicht. Die Gegenüberstellung der Häufigkeitsverteilungen der Primärbedarfe von drei aufeinanderfolgenden Jahren macht deutlich, dass die empirischen Verteilungen zum einen keine Ähnlichkeit zu theoretischen Verteilungen (z.B. Normalverteilung) besitzen und zum anderen untereinander in ihrer Form überwiegend stark differieren.

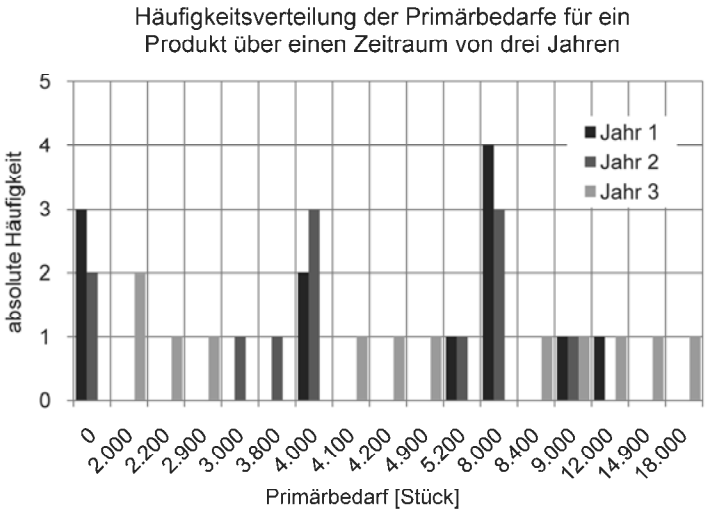


Abbildung 3: *Primärbedarfsanalyse (Häufigkeitsverteilung)*

Es ist also zu konstatieren, dass durch die Erstellung der Auftrags- bzw. Primärbedarfsszenarien über konventionelle verteilungsbasierte Pseudozufallszahlengeneratoren sich die unternehmenstypspezifische Unsicherheit der mittelständischen PDL nicht realitätsnah modellieren lässt. Aus diesem Grund wird im Assistenzsystem die Szenariengenerierung über Methoden der *Szenariotechnik* präferiert. Diese Methoden nutzen zur Szenariengenerierung neben quantitativen Informationen, die etwa aus den geschilderten Zeitreihenanalysen resultieren, auch qualitative Informationen, welche vor allem auf Experteneinschätzungen basieren. Die Vorgehensweise diesbezüglich soll im Folgenden kurz skizziert werden: In der ersten Phase der Szenarien-

generierung ist zunächst das Untersuchungsfeld abzugrenzen. Das bedeutet, hier sind die Referenzprodukte zu fixieren, für welche Szenarien entwickelt werden soll. Auch der zeitliche Umfang der zu entwickelnden Szenarien ist festzulegen. Anschließend sind Einflussfaktoren zu identifizieren, welche sich auf die Entwicklung des Untersuchungsfeldes – die produktspezifischen Auftrags- bzw. Primärbedarfsszenarien – auswirken. Diese Identifikation sollte sowohl vergangenheits-, gegenwarts- als auch zukunftsgerichtete Aspekte berücksichtigen. Insbesondere die Berücksichtigung von Einflussfaktoren, die wahrscheinlich in der Zukunft eintreten werden, stellt einen signifikanten Vorteil gegenüber konventionellen Prognoseverfahren dar. Derartige Einflussgrößen müssen durch Experten identifiziert sowie hinsichtlich ihrer Wirkungsrichtung als auch -intensität bewertet werden. In der nächsten Phase kommt es dann zur Generierung von Rohszenarien. Diesbezüglich handelt es sich um Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der ermittelten Einflussgrößen. Aus diesen Annahmebündeln und ihren immanenten Wirkungsimpulsen leiten sich in der vierten und letzten Phase die konkreten Szenarien ab. Für eine ausführliche Betrachtung der Szenariotechnik sei u. a. auf Teich et al. (2013) verwiesen. Im Assistenzsystem wird die Szenarioerstellung über einen sogenannten *Szenariogenerator* erfolgen. Diese Systemkomponente leitet den Systemnutzer bei der Szenarienentwicklung an und unterstützt ihn in den einzelnen Entwicklungsphasen mit geeigneten Methoden. Hierzu zählen beispielsweise Konsistenz- und Cross-Impact-Analysen. Die sich aus den entwickelten Szenarien ergebenden Fertigungsaufträge werden über eine Schnittstelle in das Simulationsmodell eingelastet. Ziel ist die Entwicklung von *Referenzszenarien* in Kooperation mit dem ausgewählten Referenzunternehmen. Diese Szenarien sollen die Unsicherheitssituation bei der Primärbedarfsermittlung mittelständischer PDL stellvertretend für diesen Unternehmenstyp im Rahmen der beabsichtigen Simulationsuntersuchungen charakterisieren. Eine Besonderheit stellt hier auch die Entwicklung sogenannter *Störszenarien* dar, welche die in Abschnitt 1 beschriebene ungeplante Einlastung von Fertigungsaufträgen durch die Chefebene abbilden. Unsicherheiten, die ergänzend zu den Primärbedarfsunsicherheiten ebenfalls bei Simulationsuntersuchungen zu berücksichtigen sind (z.B. Maschinenausfälle), werden durch den Einsatz stochastischer Komponenten im Simulationsmodell modelliert. Diesbezüglich sei an dieser Stelle insbesondere auf Wenzel et al. (2008) verwiesen.

Das *Stellgrößencockpit*, über welches die Auswahl und Konfiguration der im Simulationsmodell implementierten PPS-Methoden erfolgt, stellt neben dem Szenariogenerator und dem Simulationsmodell eine weitere Komponente des Assistenzsystems dar. Durch die Strukturierung des Assistenzsystems in verschiedene Systemkomponenten soll eine Trennung von Modell und Daten realisiert werden. Das heißt, anstatt konkreter Zahlenwerte werden bei der Modellierung der Produktionsumgebung und -abläufe Variablen eingesetzt, welche sich dann im Rahmen der Simulationsuntersuchungen über Schnittstellen zum Szenariogenerator und Stellgrößencockpit parametrisieren lassen. Durch diesen Systemaufbau lässt sich der Systemnutzer vom Simulationsmodell fernhalten, wodurch sich die Gefahr von ungeplanten Modellveränderungen und damit einhergehenden fehlerbehaften Simulationsergebnissen signifikant verringern lässt. Des Weiteren erhöht sich durch diesen strukturierten Aufbau die Transparenz und Verständlichkeit des Systems. (vgl. Wenzel et al. 2008). Zur Realisierung einer ganzheitlichen Trennung ist natürlich auch die Auswertung der simulativ ermittelten Ergebnisdaten vom Modell zu ent-

koppeln. Diese Auswertung erfolgt demnach über die Systemkomponente *Kennzahlencockpit*, an welche die benötigten Ergebnisdaten über eine Schnittstelle vom Simulationssystem übertragen werden. Für die Umsetzung des Simulationsmodells wird das Softwaresystem Plant Simulation von Siemens Tecnomatix und für die Realisierung der angrenzenden Komponenten Microsoft Excel präferiert. In Abbildung 4 ist die Systemkonzeption zum simulationsbasierten Assistenzsystem schematisch dargestellt.

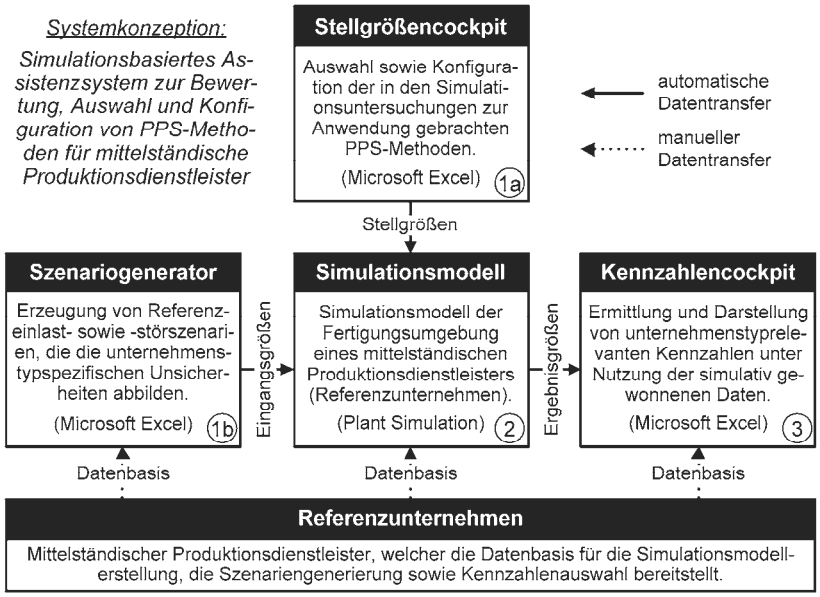


Abbildung 4: *Systemkonzeption zum simulationsbasierten Assistenzsystem*

Im Folgenden Abschnitt wird das geplante Anwendungsszenario des Assistenzsystems skizziert, wobei die Ziffern in der Darstellung der Systemkonzeption (vgl. Kreise in Abb. 4) als Orientierungshilfe dienen sollen.

3 Anwendungsperspektiven

Der erste Schritt lässt sich als *Parametrisierung des Simulationsmodells* begrifflich zusammenfassen. Hierzu gehört die Auswahl und Konfiguration der über die Simulationsuntersuchungen zu bewertenden PPS-Methoden (1a). Diesbezüglich sollen vor allem Methoden der Produktionssteuerung (z. B. Belastungsorientierte Auftragsfreigabe, BOA) hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Liefertermintreue evaluiert werden. Die entsprechenden Steuerungslogiken der unterschiedlichen Methoden werden im Modell in Plant Simulation implementiert. Durch die Einstellungen des Systemnutzers im Stellgrößencockpit lässt sich eine Logik für die Simulationsexperimente auswählen und konfigurieren. Methoden der Produktionsplanung spielen bei der Modellierung eher eine untergeordnete Rolle, da die unternehmenstypspezifischen Unsicherheiten eine geringe Planbarkeit vermuten lassen. Eine Ausnahme diesbezüglich stellen robuste Planungsansätze dar (vgl. hierzu u. a. Herrmann und Engl-

berger 2013). Neben der Methodenauswahl und -konfiguration gehört zu diesem Schritt auch die Erzeugung der Referenzeinlast- und -störszenarien, auf welche bereits in Abschnitt 3 näher eingegangen wurde (1b).

Der Parametrisierung des Simulationsmodells folgt die *Durchführung der Simulationsexperimente* (2). Unter Nutzung der Eingabe- und Steuergrößen werden die Planungs- respektive Steuerungslogik als auch die dadurch initiierten Fertigungs- und Materialflussprozesse simulativ ausgeführt. Insbesondere die *Einhaltung* der sich aus den Primärbedarfsszenarien unter Berücksichtigung der vom Markt geforderten produktspezifischen Lieferzeiten ergebenden *Liefertermine*, lässt sich nach Durchführung der Simulationsuntersuchungen *über das Kennzahlencockpit bewerten* (3). Dadurch kann auf die Einsatzeignung der jeweiligen Logik in Verbindung mit der entsprechenden Konfiguration im unternehmenstypspezifischen Produktionsumfeld der mittelständischen PDL geschlossen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von den Rahmenbedingungen der operativen PPS, mit denen mittelständische PDL zu kämpfen haben, wurde in diesem Beitrag aufgezeigt, wie ein simulationsbasiertes Assistenzsystem durch die systematische und fundierte Bewertung, Auswahl sowie Konfiguration von geeigneten PPS-Methoden, zur Bewältigung existenter Herausforderungen, wie der Unsicherheit der Primärbedarfsermittlung als auch daraus resultierenden Lieferterminverfehlungen, beitragen kann.

Hinsichtlich weiterer Anwendungsperspektiven ist zu erwähnen, dass sich die vorgeschlagene Systemkonstellation und -funktionsweise potentiell auch für die Bewertung, Auswahl sowie Konfiguration von PPS-Methoden bei anderen Unternehmenstypen , die durch ähnlich gelagerte Probleme in ihrem Produktionsumfeld charakterisiert sind, eignet. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht hier vor allem wiederum in der Abbildung der Unternehmenstypspezifika über ein repräsentatives Simulationsmodell als auch entsprechender Auftrags- bzw. Primärbedarfsszenarien.

Danksagung

Die Autoren dieses Beitrages möchten sich an dieser Stelle bei dem Referenzunternehmen für die Kooperation und Datenbereitstellung im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts, welches unter dem Förderkennzeichen 1749X08 geführt wird, sowie für die darüber hinaus geleistete Arbeit bedanken.

Literatur

Brodhun, C.: Auftragsabwicklungsmodelle für Produktionsdienstleister – Entwicklung von Konzepten und Lösungsansätzen für die materielle Auftragsabwicklung bei Contract Manufacturers – Schlussbericht. Nordhausen: Fachhochschule Nordhausen 2012.

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Berlin u. a.: Springer 2011.

Chung, W. W. C.; Yam, A. Y. K.; Chan, M. F. S.: Networked enterprise – A new business model for global sourcing. International Journal of Production Economics, 87 (2004) 3, S. 267-280.

Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. Berlin u. a.: Springer, 8. Auflage 2011.

Herrmann, F.; Englberger, J.: Robuste Optimierung zur Produktionsprogrammplanung. Erscheint in: Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M.; Brodhun, C. (Hrsg.): Divergierende Ansätze zur operativen Produktionsplanung und -steuerung. Voraussichtlich Berlin u. a.: Springer 2013.

Hürtgen, S.: Von Silicon Valley nach Shenzhen - Globale Produktion und Arbeit in der IT-Industrie. Hamburg: VSA 2009.

Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung – Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. München: Vahlen, 2. Auflage 2011.

Law, A. M.: Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill, 4. Auflage 2007.

Lanza, G.; Peter, K.; Jondral, A.: Anwenderfreundliche und komplexitätsreduzierende Bewertung und Robustheitsuntersuchung von Lean-Methoden bei kleinen und mittleren Unternehmen. In: Zülch, G., Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation – Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 189-196.

Lödding, H; Friedewald, A.; Wagner, L.: Szenariosimulation mit Simulationsbaukästen. In: Zülch, G., Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation – Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 477-483.

Rose, O.; März, L. (2011): Simulation. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik – Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin u. a.: Springer 2011.

Scholl, A.: Robuste Planung und Optimierung – Grundlagen, Konzepte und Methoden – Experimentelle Untersuchungen. Heidelberg: Physica 2001.

Scholtissek, P.: Simulationsprüfstand für Logistikkonzepte der Produktion. Düsseldorf: VDI 1996.

Sturgeon, T. J.: Modular production networks – A new American model of industrial organization? Industrial and Corporate Change, 11 (2002) 3, S. 451-496.

Syska, A.: Auftragsfertiger in Deutschland – Situation, Trends und Handlungsempfehlungen. Aachen: Shaker 2001.

Teich, E.; Brodhun, C.; Claus, T.: Einsatz der Szenariotechnik in der Produktionsplanung. Erscheint in: Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M.; Brodhun, C. (Hrsg.): Divergierende Ansätze zur operativen Produktionsplanung und -steuerung. Voraussichtlich Berlin u. a.: Springer 2013.

VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Berlin: Beuth 2010.

Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin u. a.: Springer 2008.

Werner, M.: Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen. München: Herbert Utz 2001.

Wild, J.: Grundlagen der Unternehmensplanung. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1974.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Scheduling in a Flexible Job Shop with Continuous Operations at the Last Stage

Ressourceneinsatzplanung in einer flexiblen Werkstattfertigung mit Stetigbetrieb im letzten Arbeitsschritt

Tao Zhang, Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany), tao.zhang@unibw.de, oliver.rose@unibw.de

Abstract: This paper presents a special flexible job shop scheduling problem which has continuous-operation constraints at the last stages. In other words, jobs at the last stage which need the same machine must be processed one by one without intervals. An integrated approach combining the simulation of production processes and the genetic algorithm is used to solve the problem. The processing paths of all jobs are decision variables and designed to be one individual in the genetic algorithm. The simulation with the reverse process flows evaluates the feasibility and fitness values of jobs. A satisfactory solution can be got after evolution. Finally, we apply the proposed approach to one steel-making plant.

1 Introduction

The Flexible Job-shop Scheduling Problem (FJSP) is an extension of the classical job shop scheduling problem which allows a job to be processed by any machine from a given set. The tasks are (1) to assign each job to a machine and (2) to sequence the jobs on the machines, so that certain objectives are achieved. Flexible job-shop scheduling problem is one of the most important combinatorial optimization problems, and is kind of NP-hard problem. Hence, a variety of heuristic procedures and meta-heuristic procedures have been applied to solve these problems and a near optimal schedule can be found in a reasonable time. Dispatching rules(Tay and Ho 2008) and beam search(Wang and Yu 2010) are two typical heuristic procedures. The meta-heuristics procedures includes local search(Yazdani, Amiri et al. 2010), tabu search(Li, Pan et al. 2010), simulated annealing(Xia and Wu 2005), genetic algorithm(De Giovanni and Pezzella 2010; Zhang, Gao et al. 2011; Teekeng and Thammano 2012), ant colony algorithm(Rossi and Dini 2007) and particle swarm algorithm(Moslehi and Mahnam 2011).

In this paper, we handle a special FJSP with continuous operations at the last stages. The problem is abstracted from the steel-making industry. When using the meta-heuristic procedures to solve the general FJSP, initial feasible solutions and new

feasible solutions are easy to be obtained. In the most case, arbitrary allocation of machines and sequencing can be a feasible solution. However, if using the meta-heuristic procedures to solve this problem, it is difficult to meet the continuous constraints while we try to obtain initial feasible solutions and generate new feasible solutions. For this special problem, Tang, Liu et al. (2000) generate a rough schedule firstly, which meets the continuous constraint but may contain machine conflicts. Then they use a mathematical programming model to remove the conflicts. The allocation of machines is not counted as decision variable in the scheduling problem. Atighehchian, Bijari et al. (2009) combine ant colony algorithm with non-linear optimization to solve the problem. The ant colony algorithm is used to assign machines to jobs and get the sequence of jobs on each machine. Then the non-linear programming model is used to arrange the starting time of each job on every machine. The continuous constraint is met in the no-linear programming model. Both of them take hierarchical ways (two steps) to solve the problem.

We present an integrated approach in this paper. The simulation and the genetic algorithm combine to solve the problem. The processing paths of all jobs are decision variables and designed to be one individual in the genetic algorithm. The simulation with the reverse process flows evaluates the feasibility and fitness values of jobs. A satisfactory solution can be got after evolution. Finally, we apply the proposed approach to one steel-making plant.

2 Problem Description

In this problem, the objective is to minimize the makespan of all jobs. All of jobs have the continuous operation at the last stages. Jobs can only be processed on one specified machine at the last stages. Machines at the last stages process jobs continuously, i.e. jobs at the last stage which need the same machine must be processed one by one without intervals. In other words, there is no time interval between two successive jobs processed on the same machine at the last stage.

The jobs belong to different batches. Jobs in the same batch are processed on the same machine at the last stages and there is no constraint on the sequence of jobs in the same batch. Jobs in the same batch have the same process flow too. The last machine, the number of jobs in each batch and the starting time of each batch at the last stages are given in a batching plan in this problem. The batches must start to be processed exactly at the starting time given in the batching plan. Consequently, each job has to finish at a given time because of the continuous operation at the last stages. That is to say that a strict due date is specified for each job. Moreover, the machines at the last stages cannot stop running and cannot process the job which belongs to other batches after starting to process a batch.

Except that the last stages of all jobs have only one machine, the other stages have several identical machines in parallel. Jobs at these stages may be processed on any one of the machines. Therefore, each job has only one process flow (i.e. a series of operations), but possibly has more optional processing paths (i.e. a series of machines). The task of assigning jobs to machines can be transformed into selecting processing path from the optional paths for each job. The problem turns to find an optimal combination of jobs' processing paths.

In addition, there are no buffers in front of machines and at most one job is allowed to be waiting in the transportation line before machines. A job which has completed on a given machine cannot leave the machine (is blocked) if the preceding job has not yet completed on the next machine and one job is waiting in front of the next machine.

3 Problem Solution

We combine the genetic algorithm with the simulation of production processes to solve the problem. Processing paths of all jobs make up one individual (solution) in the genetic algorithm and evolve from generation to generation in order to achieve the scheduling objective. The simulation with the reverse process flow is embedded in the evolution and controlled by the genetic algorithm. When evaluating an individual, the genetic algorithm starts the simulation in which jobs are processed following the processing paths represented by the evaluated individual. The function of the simulation is to provide the fitness value of the current individual for the genetic algorithm. Figure 1 shows the mechanism of the approach.

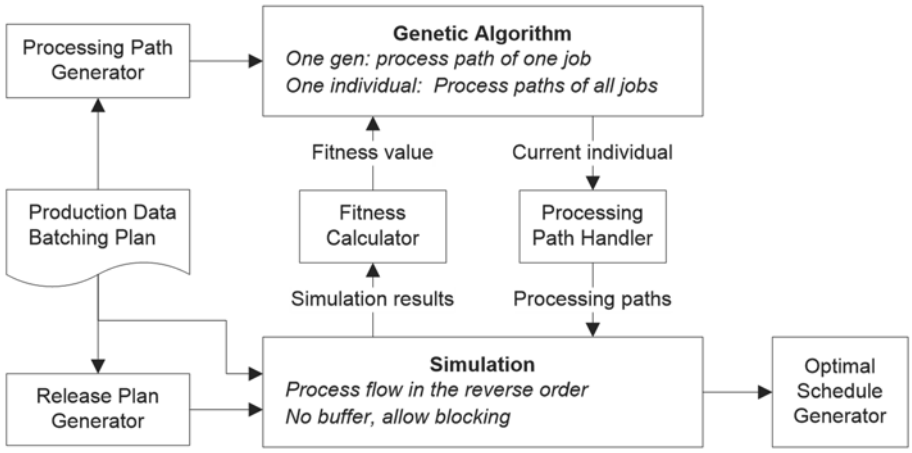


Figure 1: *Mechanism of the combination of simulation and genetic algorithm*

3.1 Genetic Algorithm

In the general FJSS problem, the decision variables are starting time of each job at each stage and binary variables which represent if machines are assigned to jobs. In this problem, the starting time of jobs at the last stages is given. The starting time at other stages can be calculated according to the processing paths under constraints. Besides, we use the selections of processing paths to replace the selections of machines. Thus, the processing paths are the only decision variables, i.e. gene. We map the problem onto the genetic algorithm and the relationship is shown in Table 1. According to the production layout and the batching plan, the processing path generator creates all possible processing paths for each job and assigns a unique ID for each path. The possible processing paths are the foundations of reproduction of individuals. A gene is one decimal number, i.e. path ID, represented one selected

processing path for one job. The processing paths of jobs in the same batch make up one chromosome and these chromosomes compose one individual. Thus, the number of chromosomes in one individual equals to the number of batches. The amount of gene in one chromosome equals to the amount of jobs in the batch.

Table 1: *Relationship among the optimization, the genetic algorithm and the problem*

Optimization	GA	The Problem
Decision variable	Gen	Processing path of each job
Variable group	Chromosome	Processing paths of jobs in the same batch
Feasible solution	Individual	Processing paths of all jobs
Objective	Fitness value	*M–makespan*, M is a big enough number
Constraint	Constraint on generating and reproducing individuals	Continuous constraint, due date, and other FJSS constraints
Process of Solving the problem	Evolution of the population	Looking for the best combination of all jobs' processing paths

The fitness proportionate selection, also known as roulette wheel selection, is used to select potentially useful solutions for reproduction. The probability of individual selection is proportionate to the fitness values. A random number $\varepsilon \in [0,1]$ is chosen. If the *k*-th individual meets the following condition (Eq. 1), the individual will be selected.

$$\sum_{i=1}^{k-1} f_i / \sum_{i=1}^{N} f_i < \varepsilon \le \sum_{i=1}^{k} f_i / \sum_{i=1}^{N} f_i \tag{1}$$

where f_i is the fitness value of the *i*-th individual and *N* is the population size. The selection operation selects pop-sized individuals into the next generation. The individual with higher fitness may be selected more times. The rest will drop out. The dropping rate varies from generation to generation due to the roulette wheel selection. The crossover and mutation will carry out among these selected individuals. The number of individuals taking part in the crossover and mutation is specified by the crossover probability and mutation probability.

The crossover takes place between two matching chromosomes in two different individuals, shown in figure 2. The number and position of genes for crossing over on the chromosomes are not limited, because one chromosome indicates the processing paths of jobs in one batch and one job's processing path is suitable for other jobs in the same batch. The mutation is subject to the restriction of possible

processing paths of each job and alters the gene value (processing path) to one of other possible gene values (other possible processing paths) , so as to meet the constraint on process flows. Figure 3 shows the mutation.

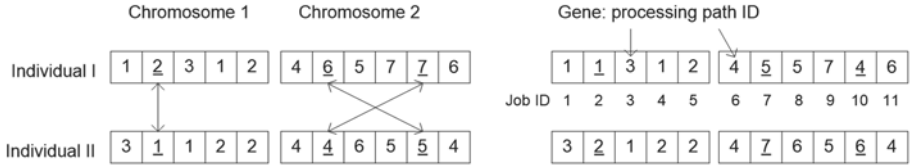


Figure 2: *Crossover operations (a) before crossover (b) after crossover*

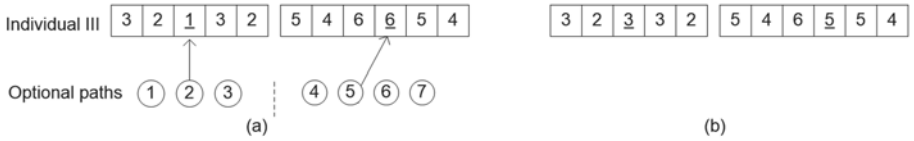


Figure 3: *Mutation operations (a) before mutation (b) after mutation*

In practice, the main issue of the genetic algorithm is to make sure that individuals meet the constraints. The general way is to modify the unfeasible individuals which do not meet the constraints after generated. In other words, the constraints are considered in the process of generating and reproducing individuals.

Algorithm 1: *Genetic algorithm*

```
Step 1: Generate initial population
Step 2: Evaluate each individual
     while the current individual (CI) is unfeasible
          Discard CI
          if CI is generated randomly
               Generate a new individual (NI) randomly
          else if CI is generated by crossover (cro.)
               Generate NI by cro. between the same parents
          else if CI is generated by mutation
               Generate NI by mutation on the same parent
          end if
          Replace CI with NI
     end while
Step 3: if the end condition is met, goto Step 5
Step 4: Reproduce the offspring, goto Step 2
Step 5: Stop and return the best individual
```

In this problem, it is difficult to modify the unfeasible individuals (processing paths) to meet the constraints, especially the continuous constraints. So we put the constraints into the process of calculating the fitness value. The feasibility of individuals is determined over the period of calculating the fitness value. The unfeasible individual will be discarded directly and not participate into reproduction.

A new individual is generated to replace the unfeasible individual. The number of unfeasible individual varies from generation to generation due to the randomization of the crossover and mutation. If the individual is feasible, we get the fitness value after calculating. In this paper, the simulation with reverse process flow is introduced to evaluate the feasibility and fitness value of individuals (see details in section 3.2). The genetic algorithm is outlined in Algorithm 1.

3.2 Simulation of production with reverse process flows

The simulation with reverse process flow is introduced to evaluate the feasibility and fitness values of individuals. The feasible individual is the individual which meets all of constraints in the problem. For the general FJSS problem, there are following constraints: each job at one stage is assigned to exactly one machine; the starting time of a job at one stage must not be earlier than the point at which the job is completed at the previous stage; a machine can process at most one job at a time. These constraints can be satisfied by using some simple rules in the simulation.

In order to meet the continuous constraints at the last stages, we build the production model with the reverse process flows, shown in Figure 4 (a) to (b). The last stages become the first and jobs are processed from the last stages to the first stages. The continuous operations convert to the job releasing with fixed time intervals which equal to the processing time at the last stages. A release plan is generated from the batching plan by the release plan generator before the simulation starts.

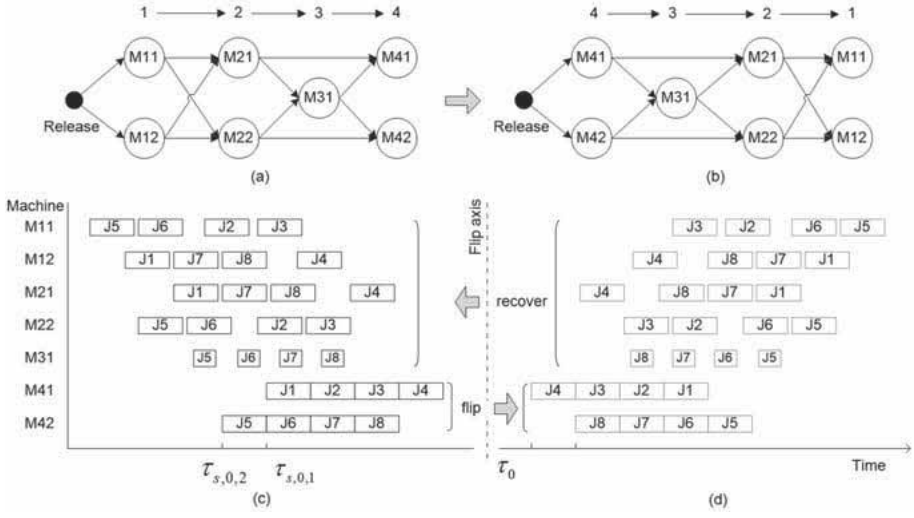


Figure 4: *Production model in the reverse order: (a) normal process flow; (b) reverse process flow; (c) normal schedule; (d) reverse schedule*

The release plan is input into the simulation. Then the simulation runs following the processing paths (reverse) represented by the evaluated individual. Once one job is blocked at the first stage (reverse), which means that the continuous constraint is not satisfied, the individual is unfeasible. Otherwise, the individual is feasible. After simulation, the makespan can be got easily as well as the fitness value.

In the coming paragraph the way how to generate the release plan is presented. The batching plan consists of the following fields: batch ID, product family, job number, last machine, starting time at the last machine. Firstly, the generator gets the completion time of all jobs at the last stages. And then it flips all of the completion time about an arbitrary time axis ($\tau = \tau_0$) to get symmetrical mirror time, i.e. starting time at the first stages in the reverse process flow, shown in Figure 4 (c) to (d). Equation 2 and 3 are for calculating the starting time (reverse),

$$\tau_{c,i} = \tau_{s,0} + (i-1)p \tag{2}$$

$$\tau'_{s,i} = 2\tau_0 - \tau_{c,i} \tag{3}$$

where $\tau_{c,i}$ is the completion time of the *i*-th job in a batch at the last stage; $\tau_{s,0}$ is the starting time of the batch at the last stage; *p* is the processing time of the job at the last stage; $\tau'_{s,i}$ the starting time (reverse) of the *i*-th job. The starting time (reverse) can be treated as the releasing plan directly which will be input into the simulation while the simulation is running.

The completion time (reverse) τ'_c for each job on each machine are recorded while the simulation is running. After the simulation, we flip all of the completion time about the specified time axis ($\tau = \tau_0$) to get symmetrical mirror time, i.e. normal starting time τ_s at each machine, shown in Figure 4 (d) to (c). Then the normal schedule is obtained. Equation 4 is for calculating the starting time.

$$\tau_s = 2\tau_0 - \tau'_c \tag{4}$$

4 Application

The proposed approach is applied to a steel plant in China. In the steel plant the billets or slabs are produced from the hot metal (molten metal) through three operations successively, including primary refining (BOF), secondary refining and continuous casting (CC). At the first two stages, the hot metal is contained in ladles and processed one ladle by one ladle. One ladle of hot metal is one job in this scheduling problem. There are two sub operations in the secondary refining stage, LF and RH. According to the steel grade of the product, some jobs only need to be processed on LF and some need both of them. Continuous casting is the last stage where the hot metal is poured into a mould and solidified into a billet or slab. The hot metal in the same batch must be poured out continuously, i.e. when a ladle turns empty the successive ladle must already arrive and start to pour the hot metal in relays. If a ladle arrives late, the continuous casting operation will be interrupted and the related equipments need to setup again. The setup takes much time. The interruption also causes unnecessary waste. Therefore, the interruption must be avoided. The layout of the plant is shown in figure 5.

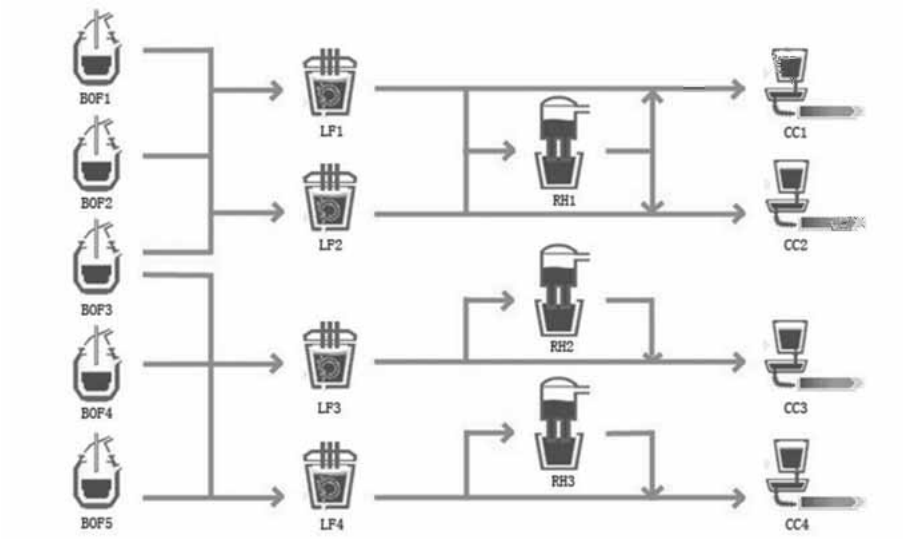


Figure 5: *Layout of the steel plant*

We accept one batching plan of one shift, shown in Table 2, and use the proposed approach to generate one near optimal static schedule. The parameters of the genetic algorithm are set as follows – generation number: 60, population size: 20, crossover probability: 0.8, mutation probability: 0.1.

Table 2: *Batching plan of one shift*

Batch ID	Steel grade	Number of jobs	Caster	Starting time of the batch	Secondary refining
Lot1	LSt12	8	CC1	19:12:00	LF+RH
Lot2	St12	9	CC2	16:56:00	LF
Lot3	DX52D	8	CC3	19:00:00	LF
Lot4	SPHD	9	CC4	17:18:00	LF+RH

The objective (makespan) is tending towards stability at 9.18 hours (shown in Figure 6). It takes 40 seconds to finish the evolution of 60 generations (CPU: 2.5GHz, Memory: 2.0GB). The final schedule is shown in Figure 7 in Gantt chart form. From Figure 7, we can see that (1) the batches start at the given time at the last stages; (2) the continuous constraint is satisfied; (3) there are no conflicts over machines.

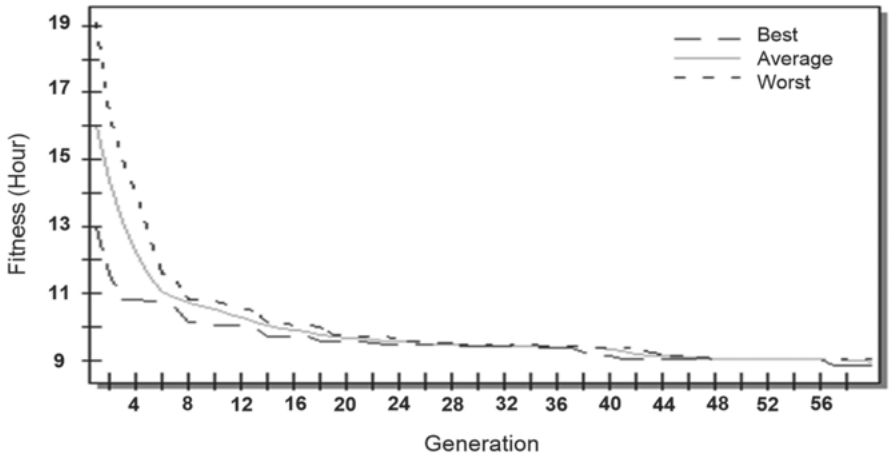


Figure 6: *Convergence during the evolution*

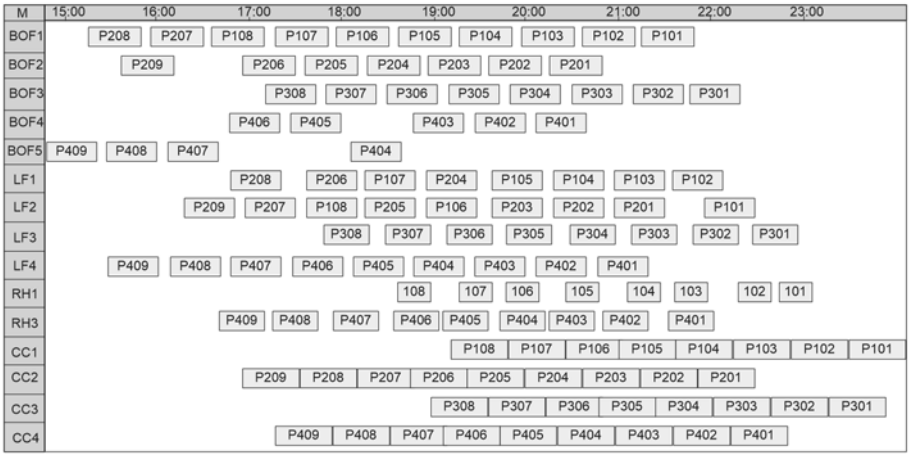


Figure 7: *Gantt chart of the final schedule*

5 Conclusion

We combine the genetic algorithm with the simulation of production processes to solve the FJSS problem with the continuous operation at the last stages. The gene indicates the processing path of the job. The selection of machines for each job at each stage in the problem is replaced by the selection of the processing path, so the crossover and mutation are simplified. The constraints are considered in the process of calculating the fitness value by the simulation. All of constraints in the general FJSS problem can easily covert to the simple rules in the simulation model. The continuous constraint is satisfied by reversing the process flows in the simulation model. The feasibility of individuals is determined by the simulation. Unfeasible individuals will be discarded directly so as to avoid complex modification to the unfeasible individuals. The fitness value of the feasible individual is easy to get after

simulation. The approach is applied to a steel plant. A static schedule made in an acceptable time meets the continuous constraints and due date. However, the proposed approach has an obvious drawback. The robustness of the schedule is poor. For example, when a disturbance takes place, e.g. breakdown, the schedule may not meet the continuous constraints any more. In this case, emergency measures in a dynamic scheduling system will adjust the in-process jobs to ensure that the last stages can still operate continuously later. Then the remaining unfinished jobs will be rescheduled. These contents will be included in our future works.

References

Atighehchian, A.; Bijari, M.; Tarkesh, H.: A novel hybrid algorithm for scheduling steel-making continuous casting production. Computers & Operations Research 36 (2009) 8, pp. 2450-2461.

De Giovanni, L.; Pezzella, F.: An Improved Genetic Algorithm for the Distributed and Flexible Job-shop Scheduling problem. European Journal of Operational Research 200 (2010) 2, pp. 395-408.

Li, J.-q.; Pan, Q.-k.; Liang, Y.-C.: An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. Computers & Industrial Engineering 59 (2010) 4, pp. 647-662.

Moslehi, G.; Mahnam, M.: A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search. International Journal of Production Economics 129 (2011) 1, pp. 14-22.

Rossi, A.; Dini, G.: Flexible job-shop scheduling with routing flexibility and separable setup times using ant colony optimisation method. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23 (2007) 5, pp. 503-516.

Tang, L.; Liu, J.; Rong, A.; Yang, Z.: A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production. European Journal of Operational Research 120 (2000) 2, pp. 423-435.

Tay, J. C.; Ho, N. B.: Evolving dispatching rules using genetic programming for solving multi-objective flexible job-shop problems. Computers & Industrial Engineering 54 (2008) 3, pp. 453-473.

Teekeng, W.; Thammano, A.: Modified Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling Problems. Procedia Computer Science 12 (2012) 0, pp. 122-128.

Wang, S.; Yu, J.: An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. Computers & Industrial Engineering 59 (2010) 3, pp. 436-447.

Xia, W.; Wu, Z.: An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. Computers & Industrial Engineering 48 (2005) 2, pp. 409-425.

Yazdani, M.; Amiri, M.; Zandieh, M.: Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm. Expert Systems with Applications 37 (2010) 1, pp. 678-687.

Zhang, G.; Gao, L.; Shi, Y.: An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. Expert Systems with Applications 38 (2011) 4, pp. 3563-3573.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Linking deterministic aggregate production planning with a stochastic simulation model using a planned utilisation factor

Integration einer deterministischen Jahresplanung mit einem stochastischen Simulationsmodell durch einen Planauslastungsfaktor

Thomas Felberbauer, Klaus Altendorfer, Herbert Jodlbauer, Upper Austria University of Applied Science, Steyr (Austria), thomas.felberbauer@fh-steyr.at, klaus.altendorfer@fh-steyr.at, herbert.jodlbauer@fh-steyr.at

Abstract: We consider a production system with a flow-shop structure inspired by a production company operating in the automotive sector with forecast errors. A hierarchical production planning approach is carried out in a simulation model whereby the periodically performed aggregate planning is implemented by a MIP-solver. To account for the stochastic behaviour of real production systems a planned utilization factor is introduced in the MIP model for the aggregate planning. In a simulation study, the influence of this planned utilization factor on overall costs and the influence of forecast errors on the optimal planned utilization are investigated for seasonal and constant monthly forecast / demand patterns. We identify a high cost reduction potential with implementing this planned utilization factor and for a specific scenario optimal values are derived. Furthermore, the study shows that higher forecast errors lead to lower optimal planned utilization values.

1 Literature Review

In production planning and control, hierarchical decision models with decision levels differing in time horizon and decision variables are widely used. For basic problem formulation see Hax and Meal (1975), Meal (1984), Schneeweis (2002) and Hopp and Spearman (2008). Especially the MRPII concept (Manufacturing resource planning), as for example presented in Hopp and Spearman (2008), is a structured approach which is widely used. It consists of three planning levels: long-term planning (strategy), intermediate planning (tactical) and short term control (operational). The long-term planning involves the three functions: forecasting, resource planning and aggregate planning. The aggregate planning determines appropriate levels of production, inventory and staffing (internal-capacity, external-capacity and overtime). According to Hopp and Spearman (2008), optimization techniques such as linear (LP) or mixed integer programming (MIP) are used to

solve the aggregate planning optimization problem. Hax and Meal (1975), Gfrerer and Zäpfel (1995) and Zäpfel (1996) present respective models for aggregate planning. The main functions of the mid-term planning are master production scheduling (MPS), which compares the production plan with the actual customer orders, and material requirements planning (MRP) which identifies a list of production orders (see Hopp and Spearman 2008 for MPS and Orlickey 1975 for MRP). The short-term planning conducts scheduling and dispatching tasks (see Panwalkar and Iskander 1977) for production orders and available resources.

The hierarchical structuring of the production planning and control decisions has the advantage of splitting up different decision variables to their respective time horizons and therefore ensures their manageability. However, the restrictive structure of this approach, meaning that the upper level decisions are the constraints for lower level decisions and the feedback loop, that actual inventory levels and scheduled receipts influence upper decisions levels having shortfalls. Some examples of studies on the influence on the interaction of different planning levels are Framin et al. (2000) discussing the impact of the short term control on the midterm planning method CONWIP or Dauzere-Peres and Lasserre (1994) providing an integrated planning and scheduling approach. One of the occurring problems is that decision problems often used for the long term level are deterministic (see Schneeweis 2002 and Hax and Meal 1975) but the real production system faces a set of stochastic influences. One aspect of this problem is discussed in the current study.

2 Introduction

We investigate the influence of optimizing the long term production plan (including production amount and capacity levels) assuming a deterministic production system and applying it to a stochastic production system which fulfils the MPS, MRP and dispatching functionality according to the MRPII concept. Processing times, order amount and order arrivals are random. In detail, a planned utilization factor η, which defines the internal utilization of the production system, is included in the long term MIP problem for aggregate planning. This planned utilization factor defines the internal production system utilization. Its effect on service level and overall costs including capacity, tardiness and inventory costs is studied. The hierarchical production planning approach is modelled with a simulation generator (see Hübl et al. 2011 and Felberbauer et al. 2012). A rolling horizon planning is conducted for the long and mid-term planning level. For the aggregate planning (MIP problem) we build an interface between the simulation software AnyLogic© and the exact solver CPLEX©. The aggregate planning problem is solved three times per year, via function call within the simulation model, for a planning horizon of twelve month T. There is a cross data exchange between the simulation model and the MIP-Solver. The MIP-Solver uses transaction (inventory levels) and master data (forecasts, processing times and shift systems) from the simulation model and returns the optimal production programme (inventory levels, production amount per month and internal and external capacities per month of the machine groups). The production system structure is similar to that of many automotive suppliers. However, it is a streamlined version of such systems which clearly restricts the findings in this study. The streamlined structure, including customer demand pattern, bill of material,

routing information and planning methods has been created based on project knowledge of past applied studies in this industry. Based on the generic simulation model, the same study can be conducted using real company data to fill the database whereby such data is available in common ERP (enterprise resource planning) or MES (manufacturing execution system) systems.

By applying a numerical study, we investigate how much capacity flexibility is needed in the aggregate planning (MIP model) to reach an appropriate operational service level with respect to minimal overall costs. In a second study, we observe how the optimal planned utilization factor η_{opt} changes by an increasing forecast error. The forecast error incorporates the stochastic difference between deterministic monthly order rates from forecast and the stochastic realized monthly order rates in the simulation model. In further research we would like to create analytic models where the planned utilization factor η can be calculated according to the customer pattern and compare the results of the analytic model with the numerical study.

3 Model Description

3.1 Simulation Model

For the simulation study, a generic scalable simulation model is used, similar to the simulation study in Felberbauer et al. (2012). The core concept of the scalable simulation model is presented in Hübl et al. (2011) which explains the parameterization by a database. Thereby, it is possible to define different simulation scenarios without any adaption of the simulation model (programmed in Anylogic 6.9) itself. For a detailed description of the simulation modules compare, Felberbauer et al. (2012) and Hübl et al. (2011).

3.2 Aggregate Planning

We model the aggregate planning as a mixed integer problem MIP by employing the following decision variables. $x_{pt} \geq 0$ is the optimal production programme of sales product p out of P sales products in time period t. $K_{tj}^{e} \geq 0$ is the capacity of machine group j in time period t which is processed by an external company, is able to provide the required technology of machine group j out of J machine groups. Finally, the binary decision variables S_{tjs} are introduced for setting the applied shift plan and therefore the available internal capacity per machine group j and time period t. The optimal production programme x_{pt} and the respective inventory levels $l_{pt}$are disaggregated from months into days and used in the MRP-Planning approach (mid-term planning) of the simulation, which is calculated daily. Additionally, the optimal production programme x_{pt} is used as input for the MPS. In our model, the Gregorian calendar of 2013 is used and two shift plan models (five days and two shifts; five days and three shifts, per week) are available. The internal capacity per machine group, month t, and shift plan s, K_{tjs}^{i} relies on the respective shift plan and the calendar of the considered year. The selected shift plan S_{tjs} out of S shift plan possibilities and the external capacity K_{tj}^{e} per machine group j and time period t is applied and respectively outsourced according to the MIP results.

$$Min \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{J} \left(K_{t,j}^{e} c^{e} + \sum_{s=1}^{S} K_{t,j,s}^{i} c^{i} S_{t,j,s} \right) + \sum_{p=1}^{P} c^{h} l_{pt} \tag{1}$$

$$\sum S_{t,j,s} = 1 \qquad \begin{matrix} \mathrm{t} = 1,...,\mathrm{T} \\ \mathrm{j} = 1,...,\mathrm{J} \end{matrix} \tag{2}$$

$$\sum_{p=1}^{P} x_{p,t} a_{p,j} \le \eta \sum_{s=1}^{S} K_{t,j,s}^{i} S_{t,j,s} + K_{t,j}^{e} \qquad \begin{matrix} \mathrm{t} = 1,...,\mathrm{T} \\ \mathrm{j} = 1,...,\mathrm{J} \end{matrix} \tag{3}$$

$$l_{p,0} = l_{p}^{s} \qquad t = 1,...,T \tag{4}$$

$$l_{p,t} = l_{p,t-1} + x_{p,t} - F_{p,t} \qquad t = 1,...,T \tag{5}$$

$$l_{p,t}, x_{p,t} \ge 0 \qquad \begin{matrix} p = 1,...,P \\ t = 1,...,T \end{matrix} \tag{6}$$

$$K_{t,j}^{e} \ge 0 \qquad \begin{matrix} t = 1,...,T \\ j = 1,...,J \end{matrix} \tag{7}$$

$$S_{t,j,s} \in \{0,1\} \qquad \begin{matrix} t = 1,...,T \\ j = 1,...,J \\ s = 1,...,S \end{matrix} \tag{8}$$

The objective function (1) minimizes the costs of internal / external capacity (at cost rate c^i and c^e for machine group j respectively) and the holding costs (holding costs rate per day c^h) which accrue by fulfilling the required demand. Due to constraints (2) only one shift plan can be applied for one machine group in one time period. Constraints (3) ensure that the capacity needed to produce the optimal production programme on the machine groups is lower or equal to the available capacity of internal and external resources. The external capacity is unlimited and the internal available capacity per machine group is dependent on the applied shift plan and the planned utilization factor η. The planned utilization factor is a real number between zero and one and its relevance is discussed in 3.5. The actual inventories of the simulation for all sales products l_p^s are defined as start inventories $l_{p,0}$ for the aggregate planning in constraints (4). Constraints (5) ensure that the required demand per period is fulfilled by the optimal production programme and the delta of the inventory of period *t-1* and period *t*. Finally, the constraints' (6)-(8) define the decision variables.

4 Problem Description

4.1 Production System Structure

The modelled production system follows a flow shop structure inspired by a production company operating in the automotive sector. The flow shop consists of six machines (M1-M6) which are arranged in three machine groups corresponding to production, assembly and packaging. In each group there are two individual machines which are technologically identical.

Figure 1 shows the bill of material (BOM) and the low level code (LLC). The arrows indicate which child item is required to produce one parent item and the cardinality in the arrows states the required number of materials. The materials in LLC 3 are purchased parts and in our study they are always available. All items as well as materials 20, 21, 30, 31 are MRP planned.

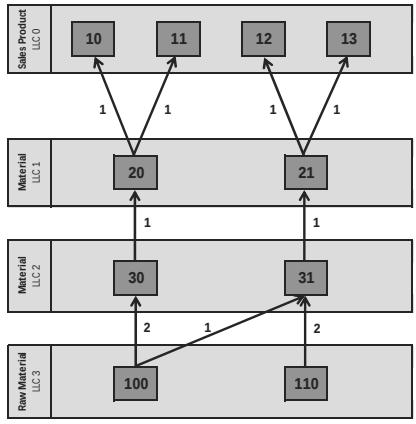


Figure 1: *Bill of Material*

Items1x are produced on machine group MG3 (packaging), items 2x are produced on machine group MG2 (assembly), and items 3x are produced on machine group MG1 (production). Generally, the production orders generated by the MRP-planning algorithm are sorted by the modified earliest due date (MEDD) dispatching rule. Each processing step requires a random processing time with an expected value E[p]=10 and a variance Var[p]=1. The expected value and the variance of the independent and identically lognormal distributed processing time is equal for all items and machine-routing-combinations.

4.2 Forecast / Demand Patterns

Two different forecast / demand patterns are considered. The overall forecast amount F_p per year and sales product is a deterministic value and is equal for all investigated scenarios. In this paper, two different forecast / demand patterns are considered. In the first scenario, the forecast per sales product and month is constant and is calculated according to $F_{p,t} = \frac{F_p}{T}$. Note that T is the number of month in a

year, thus 12. The second forecast / demand pattern follows a seasonal sinus-demand-function. The phase shift of the sinus function is six time periods, therefore the forecast per month decreases during the first three time periods. The amplitude for the seasonal forecast pattern is $0.5\frac{F_p}{T}$ and the investigated time periods are again 12 months. The first row of Table 1 shows the seasonal forecast of the sales products 10 and 12; the second for product 11 and 13.

Table 1: *Seasonal demand*

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10/12	1,000	750	567	500	566	1,000	1,250	1,433	1,500	1,433	1,500	1,433
11/13	1,500	1,125	850	750	1,000	1,250	1,433	1,500	1,433	1,500	1,433	1,875

For both forecast / demand patterns the random value of demand per sales product p and time period t is $D_{p,t}$. The forecast error is an identically independent lognormal-distributed random variable with an expected value $\mathrm{E}[\mathrm{D}_{p,t}] = F_{p,t}$ and standard deviation of $\sigma_{D_{p,t}} = \alpha F_{p,t}$ for each sales product. Forecast error parameter α defines the quality of the forecast. The actual amount per order and item o_p is lognormal distributed with expected value $E[o_p] = 10$ and variance $Var[o_p] = 1.5$ for sales products 10 and 12, as well as expected value $E[o_p] = 15$ and variance $Var[o_p] = 2.5$ for items 11 and 13. For all scenarios the overall forecast amount F_p of sales products 10 and 12 is 12,000 pieces for each and 18,000 pieces for sales products 11 and 13 respectively.

4.3 Preliminary Study - Planned Internal Utilization Factor η

In a preliminary study (stable forecast-demand pattern, $\mathrm{E}[\mathrm{D}_{pt}] = 0$ and $\sigma_{D_{p,t}} = 0$), a low service level and overall cost performance has been identified when applying the standard long range planning (integrating a mixed integer problem for the calculation of an optimal production programme in the simulation model). The MIP-model tries to reduce capacity costs by adapting shift models, outsourcing and make to stock decisions. These decisions, based on the deterministic production system assumption lead to problems with the service level performance and overall costs in the stochastic environment of the simulation model, which mimics the real world production system. In this preliminary study, a service level of 1.6 % is found, which results in high tardiness costs. In detail, the problem is that the mixed integer problem provides too less internal capacity (utilization of the internal production system is 100%), so the production system has no chance to react on the stochastic customer demand. To deal with this problem efficiently, the planned utilization factor η is implemented into the mixed integer model of the long range planning, which provides capacity flexibility within the internal production system. The planned utilization factor η defines the planned internal production system utilization.

5 Numerical Study

5.1 Experiment Design

The performance measures for all studies conducted are the average overall costs per day separated into inventory, tardiness, internal capacity and external capacity costs. To avoid situations with seemingly low costs, but only due to excessively delaying customer orders, the tardiness costs are corrected at the end of the simulation run. Therefore, all customer orders that cannot be satisfied at the end of the simulation time are penalized due to their tardiness. The ratio of the inventory cost rate to the tardiness cost rate is chosen to be 1:19 (see also Axsäter 2000 for details on this ratio). The ratio of the internal and external capacity costs is 1:2.1 (€50 per hour internal €105 per hour for external capacity). The holding costs are increasing with a decreasing low level code and are €0.5 for items 1x, €0.2 for materials 2x and €0.1 for materials 3x per day and piece. In the experiments we simulated for four whole years with the above described annual forecast / demand behaviour are analysed, whereby the first year is the warm up time of the simulation model and therefore excluded from the analysis. Each run is replicated 20 times to account for stochastic variance.

5.2 Numerical Study - Planned Internal Utilization Factor η

Part one of the numerical study investigates the influence of the planned utilization factor η for constant and seasonal demand pattern. Figure 2 shows service level [%] and overall costs [€] with respect to the planned utilization factor η which is equivalent to the internal production system utilization (long dashed line → overall costs; short dashed line → service level).

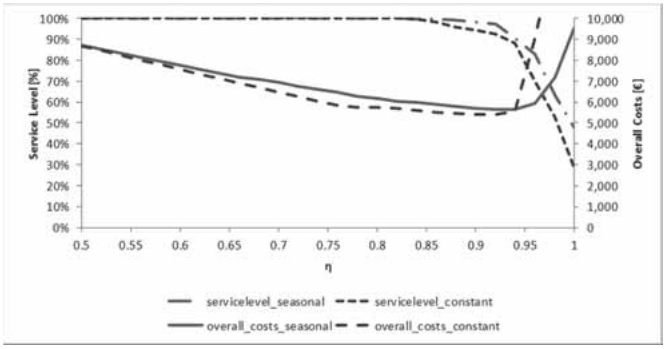


Figure 2: *Comparison of service level and overall costs for the constant and seasonal forecast / demand pattern*

The optimal planned utilization factor η_{opt} for the constant forecast / demand pattern is 0.92 with €5,388 overall costs and a service level of 92.3%. High production system utilization ($\eta \geq 0.95$) leads to high overall costs, due to the high tardiness costs, and respectively to a poor service level performance. For low production system utilization ($\eta \leq 0.85$), the service level performance is constantly 100%. The overall costs are decreasing with increasing production system utilization due to the

decline in the need of external capacity which is more expensive per hour than the internal one.

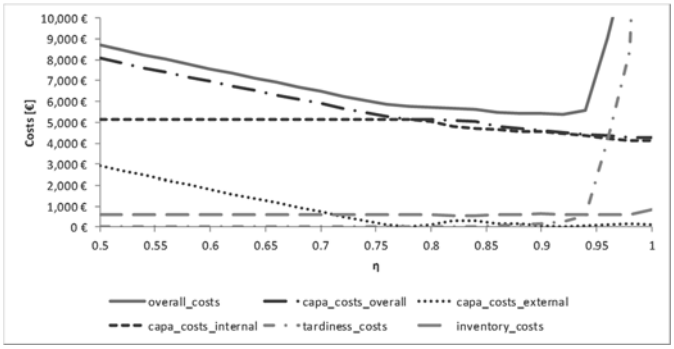


Figure 3: *Single parts of overall costs for the constant demand pattern*

Figure 3 shows the single parts of the overall costs for the constant demand pattern. The internal capacity costs are rather constant for the production system utilization range 50% to 80 %. Within that range the claimed flexibility is only reachable with a three shift model for all months and additional external capacity. The external capacity costs decrease with an increasing production system utilization up to 75%. From that point on, the external capacity costs are nearly always zero. The overall capacity costs are decreasing with increasing production system utilization. Furthermore, Figure 2 shows that the tardiness costs are responsible for the sharp increase of the overall cost for a production system utilization of more than 95%. Inventory costs increase with respect to high production system utilizations even though the finished good inventory (FGI) decreases. The reason for this is the surge of Work in Progress (WIP).

Seasonal forecast / demand pattern

Figure 2 shows the overall cost and service level results of the seasonal demand pattern (solid line → overall costs; chain dotted line → service level).

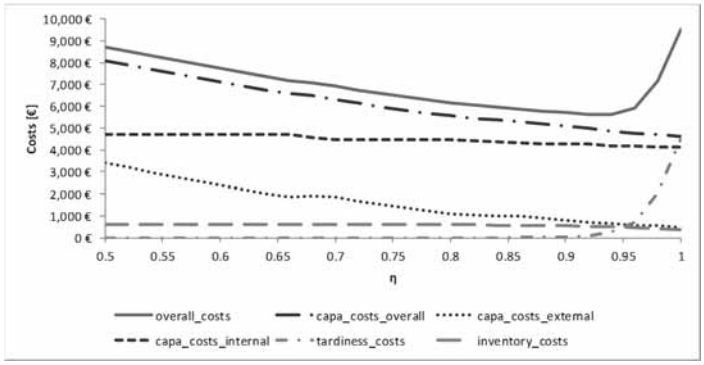


Figure 4: *Single parts of overall costs for the altering planned utilization factor η for the seasonal demand pattern*

The optimal planned utilization factor η_{opt} for the seasonal forecast / demand pattern is again 0.92 with €5,625 overall costs and a service level of 97.1%. Generally the service level, the costs and the inventory (FGI and WIP) have a quite similar behaviour for the altering planned utilization factor as in the constant demand pattern. But there are also some differences: The constant demand pattern has lower overall costs for the optimal planned utilization factor η_{opt}. In the seasonal demand pattern, the overall capacity costs are higher due to the higher amount of external capacity needed as you can see when you compare Figure 3 with Figure 4.

For high production system utilization, we found that in the seasonal demand pattern, the required capacity per machine group is changing from 1.3 to 3.9 required shifts per month. In the constant forecast / demand pattern, the required capacity is constant: 2.6 shifts per month. In the constant case with a high planned utilization, the MIP-model switches between three and two shifts and no external capacity is required. In the seasonal demand pattern, the MIP model tries to adapt the internal and external capacity according to the required capacity per month. The higher external capacity of the seasonal demand pattern has a positive influence on the overall costs and service level performance for high production system utilization as shown in Figure 2.

5.3 Numerical Study – Influence of the Forecast Error

In the second numerical study, the optimal overall costs and the optimal planned utilization factor η_{opt} are studied for different forecast error deviation factors α. The range of α is between 0 and 0.5 and the expected value of the actual monthly demand is kept at $\mathrm{E}[\mathrm{D}_{p,t}] = F_{p,t}$.

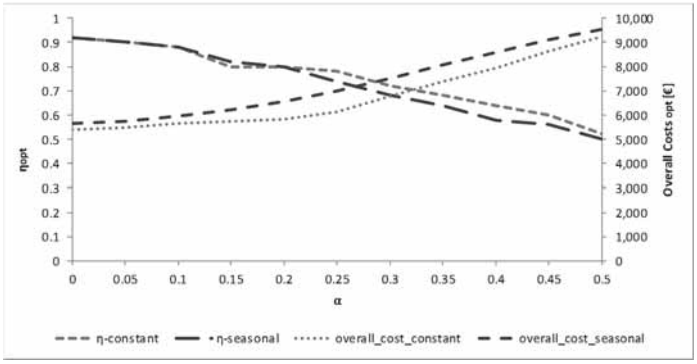


Figure 5: *Comparison of service level and overall costs for the altering forecast error deviation factor α for the constant and seasonal forecast / demand pattern*

The study shows that the overall costs of both, the constant and the seasonal demand pattern, have a positive correlation to α. The overall cost of the seasonal forecast / demand -pattern are higher than the ones of the constant pattern. For low α-factors, the optimal production system utilization η_{opt} of the constant and the seasonal

demand pattern is similar. For higher deviations of the forecast error, the seasonal demand pattern needs more flexibility than the constant one.

6 Results

Additionally, to the presented results in the numerical studies, managerial insights can be formulated. Generally, the studies show that an aggregate planning without the consideration of a planned utilization factor would lead to high overall costs and a poor service level performance. The implementation of the planned utilization factor accounts for the stochastic behaviour of the real production system built in the simulation model. Furthermore, it is shown that excessive internal production system utilization runs the risk of high overall costs. Additionally, low service level would cause lost sales due to unsatisfied customers, which is not considered in our studies. Another finding is that a good forecast quality leads to a higher production system utilization and therefore lowers overall costs.

References

Axsäter, S.: Inventory control. Bosten, Dordrecht London: Kluwer Academic Publisher 2000.

Dauzere-Peres, S.; Lasserre, J.: An Integrated Approach in Production Planning and Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (1994)

Felberbauer, T.; Altendorfer K.; Hübl, A.: Using a scalable simulation model to evaluate the performance of production system segmentation in a combined mrp and kanban system. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, Berlin (Germany), 2012.

Framinan J., Ruiz-Usano R., Leisten R. Input control and dispatching rules in a dynamic CONWIP flow-shop. International Journal of Production Research 38 (2000), pp. 4589-4598.

Gfrerer, H.; Zäpfel G.: Hierachical model for Production planning in the case of uncertain demand. European Journal of Operational Research 86 (1995), pp. 142-161.

Hax, A.; Meal H.: Hierarchical integration of production planning and scheduling. TMS Studies in Management Science 1 (1975), pp. 53-69.

Hopp, W.; Spearman, M.: Factory physics, 3. ed., Boston: McGraw-Hill 2008.

Hübl, A.; Altendorfer, K.; Jodlbauer, H.; Gansterer, M.; Hartl R.: Flexible model for analysing production. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, Phoenix (USA), 2011, pp. 1554-1565.

Meal, H.: Putting production decisions where they belong. Harvard Business Review 62 (1984) 2, pp. 102-111.

Orlicky, J.: Material requirements planning. The new way of life in production and inventory management. New York: McGraw-Hill 1975.

Panwalkar, S.; Iskander W.: A survey of scheduling rules. Operations Research 25 (1997) 1, pp. 45-61,

Schneeweiß, C.: Einführung in die Produktionswirtschaft, 8. ed. Berlin: Springer series 2002.

Zäpfel, G.: Production Planning in the case of uncertain individual demand. Extension for an MRP. International Journal of Production Economics (1996) 26, pp. 257-264.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulationsbasierte Ermittlung von Kapazitätsbelastungsfaktoren zur Produktionsprogrammplanung

Simulation-based determination of capacity load factors for master production scheduling

Julian Englberger, Frank Herrmann, HS Regensburg, Regensburg (Germany), julian.englberger@hs-regensburg.de, frank.herrmann@hs-regensburg.de

Thorsten Claus, TU Dresden (IHI Zittau), Zittau (Germany), thorsten.claus@tu-dresden.de

Abstract: This paper deals with the problem of varying capacity load factors in master production scheduling. A simulation system of a production planning and control system and of a production system is described and an approach to compute the capacity loads from the simulation results is developed. This approach is used to measure period-specific capacity load factors for master production scheduling. The measured capacity load factors vary over time and show that the common assumption of the capacity load factors being period-independent is inappropriate. A stochastic programming model to cope with this variation is described. This model is compared to a common linear programming model for master production scheduling in a simulation experiment. The results show that the use of the measured capacity load factor scenarios improves the quality of the estimation of the capacity load factors significantly.

1 Problemstellung und Stand der Technik

Dieser Beitrag bezieht sich auf ein hierarchisches Planungskonzept, welches in kommerziell verfügbaren Systemen zur operativen Produktionsplanung und -steuerung üblicherweise umgesetzt ist. Dieses Konzept beinhaltet die Hierarchieebenen Produktionsprogrammplanung, Materialbedarfsplanung und Fertigungssteuerung (siehe Herrmann 2011, Kurbel 2011). In der Produktionsprogrammplanung werden Produktionsmengen für Endprodukte geplant, mit denen Kundenbedarfe befriedigt werden. Kapazitätsgrenzen der Produktionssegmente führen in Phasen mit hohen Kundenbedarfen häufig dazu, dass Endprodukte vorproduziert werden müssen. Die Abschätzung der Kapazitätsbelastung durch die geplanten Produktionsmengen erfolgt in der Regel über sogenannte Kapazitätsbelastungsfaktoren. Diese Kapazitätsbelastungsfaktoren

geben an, wann vor der Fertigstellung eines Endprodukts welche Produktionssegmente wie stark belastet werden.

Die Höhen der durch ein Produktionsprogramm verursachten Kapazitätsbelastungen hängen von mehreren Faktoren ab; ein wesentlicher ist der Zusammenhang zwischen Auslastung des Produktionssystems und Durchlaufzeit von Produktionsaufträgen. Er ist bei niedrigen Auslastungen linear, wird jedoch mit steigender Auslastung aufgrund der zunehmenden Ressourcenkonkurrenz stark nichtlinear (siehe u.a. Kacar et al. 2012, Ravindran et al. 2011). Dieser Zusammenhang wird häufig in Form von nichtlinearen Clearing Functions simulationsbasiert oder analytisch unter Verwendung der Warteschlangentheorie ermittelt und in verschiedenen Planungsverfahren eingesetzt. Ein Überblick über Ansätze zur Clearing Function findet sich in Pahl et al. (2007), ein Optimierungsmodell unter Verwendung der Clearing Function wurde in Asmundsson et al. (2009) entwickelt. Einen weiteren Ansatz zur Berücksichtigung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Auslastung und Durchlaufzeit beschreiben Byrne und Bakir (1999). Dort wird abwechselnd ein Simulationssystem durch Ergebnisse der Lösung eines Optimierungsmodells gesteuert und ein Optimierungsmodell aus Simulationsergebnissen parametrisiert, bis eine Lösung gefunden wird, die sowohl optimal (im Optimierungsmodell) als auch kapazitiv zulässig (im Simulationssystem) ist. Kim und Kim (2001) kombinieren einen auf die Halbleiterproduktion bezogenen Ansatz von Hung und Leachman (1996) zur Ermittlung der Belastung des Produktionssystems durch Einzelprodukte mit dem Ansatz von Byrne und Bakir (1999). Die Ermittlung der zeitlichen Verteilung der Kapazitätsbelastung erfolgt dabei simulationsbasiert; die Höhe der Belastung wird durch die Bearbeitungszeiten der Produkte vorgegeben. Byrne und Hossain (2005) erweitern diesen Ansatz für den Einsatz in Just-In-Time-Produktionssystemen. Noch gravierender wird dieses Problem durch die Aggregation in der Produktionsprogrammplanung. Aufgrund dieser müssen bei der Ermittlung der Kapazitätsbelastung durch ein Endprodukt sämtliche Vorprodukte mitberücksichtigt werden. Üblicherweise wird angenommen, dass die Kapazitätsbelastungen linear mit den Produktionsmengen steigen. In eigenen Simulationsuntersuchungen treten jedoch insbesondere bei großen Loszusammenfassungen große Schwankungen der Kapazitätsbelastungsfaktoren auf; deswegen ist diese Annahme unzutreffend. Tatsächlich schwanken die Kapazitätsbelastungsfaktoren im Zeitablauf. In diesem Beitrag soll ein Verfahren zur simulationsbasierten Ermittlung der Kapazitätsbelastungsfaktoren entwickelt werden. Durch die Angabe genauerer Kapazitätsbelastungsfaktoren soll die Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung und damit die kapazitätsmäßige Umsetzbarkeit des Produktionsprogramms verbessert werden.

2 Testproblem

Anhand des folgenden Testproblems werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren untersucht. Betrachtet wird ein Teil der Produktion eines Herstellers von Hochspannungs-Energietechnik aus Regensburg. Es werden zwei Endprodukte gefertigt, die jeweils sieben Komponenten besitzen. Insgesamt werden 13 Produkte in einer generellen Stücklistenstruktur (siehe Abbildung 1) betrachtet.

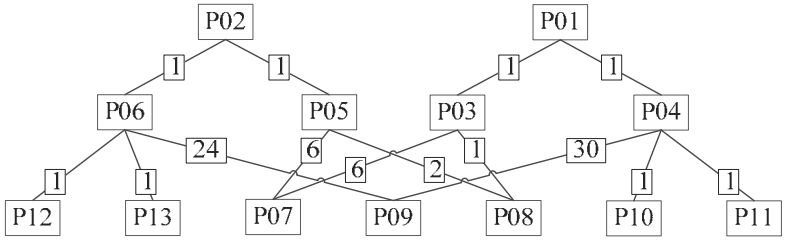


Abbildung 1: *Gozintograph zur Fallstudie*

Jedes Produkt hat einen linearen Arbeitsplan mit zwischen einer und vier Operationen. Die Produktion erfolgt auf den Produktionssegmenten Fräsen, Feinbearbeitung und Montage. Das Produktionssegment Fräsen besteht aus drei gleichartigen Fräsmaschinen, das Produktionssegment Feinbearbeitung besteht aus einer Schleifmaschine, einer Waschmaschine sowie einem Arbeitsplatz zum Entgraten der Werkstücke. Die Montage verfügt über zwei Arbeitsplätze. Jede Operation ist einer oder mehreren (parallelen) Produktionsmaschinen bzw. Arbeitsplätzen zugeordnet. Das Testproblem wird als repräsentativ für Problemstellungen mit Rüstzeiten der einzelnen Operationen zwischen 10 und 30 Minuten und Stückbearbeitungszeiten zwischen 1 und 75 Minuten erachtet; deswegen wird darauf verzichtet, die einzelnen Arbeitspläne im Detail anzugeben.

Die Durchführung und Planung dieser Produktion wird simuliert in einem Simulationssystem, welches am Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung der Hochschule Regensburg entwickelt wurde. In diesem Simulationssystem ist die eingangs beschriebene in der Industrie üblicherweise eingesetzte Planungshierarchie zur Produktionsplanung und -steuerung sowie das Produktionssystem modelliert. Dieses Simulationssystem wurde um die im Folgenden beschriebene Hauptproduktionsprogrammplanung und Messung der Kapazitätsbelastungsfaktoren erweitert. Als Simulationsumgebung dient die Software Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Im Simulationssystem wird – entsprechend der betrieblichen Realität – auf verschiedenen zeitlichen Aggregationsebenen gearbeitet. Während das Scheduling mit quasi-kontinuierlicher Zeit arbeitet, bezieht sich die Auslieferung der Kundenaufträge sowie die Mengenplanung auf Tagesperioden. Die Hauptproduktionsprogrammplanung erfolgt auf Wochenebene. Jede Simulationsuntersuchung erfolgt über einen Zeitraum von $T^{MRP,sim}$ Mengenplanungs- bzw. Auslieferungsperioden (Tagen). Dieser Zeitraum entspricht $T^{HPP,sim}$ Hauptproduktionsprogrammplanungsperioden (Wochen).

Die hierarchisch höchste Planungsebene im Simulationssystem ist die Produktionsprogrammplanung. Diese erfolgt in der Simulation – stellvertretend für andere Verfahren zur Produktionsprogrammplanung – durch die Lösung des Optimierungsmodells HPPLAN aus Günther und Tempelmeier (2012). Aufgrund der Optimalität der Planungsergebnisse kann in den im weiteren Verlauf des Beitrags beschriebenen Untersuchungen die Verbesserung der Planungsergebnisse eindeutig der Verbesserung der Kapazitätsabschätzung zugeordnet werden; Einflüsse durch Unzulänglichkeiten von Planungsverfahren können so ausgeschlossen werden. Das Optimierungsmodell ist in der Entwicklungsumgebung IBM ILOG Optimization Studio Version 12.5 umgesetzt und wird durch den

CPLEX-Solver gelöst. Jede Hauptproduktionsprogrammplanungsperiode wird ein Planungsproblem gelöst. Dazu werden zunächst die Problemparameter auf der Basis des aktuellen Zustands des simulierten Produktionssystems ermittelt. Anschließend wird aus dem Simulationssystem die Lösung des Optimierungsproblems durch den CPLEX-Solver angestoßen. Die Lösung des Optimierungsproblems wird dann zurück an das Simulationssystem übergeben und umgesetzt. Die Produktionsprogrammplanung erfolgt auf der Basis von Kundenaufträgen. Jeder Kundenauftrag umfasst die Bestellung einer Menge eines Endprodukts, die zu Beginn einer bestimmten Bedarfsperiode ausgeliefert werden soll. Die Planungsergebnisse der Produktionsprogrammplanung sind die Produktionsmengen je Woche und je Endprodukt sowie die zu verwendenden Zusatzkapazitäten je Woche und je Produktionssegment.

Die Planungsergebnisse der Produktionsprogrammplanung werden im Simulationssystem zeitlich von Wochen- auf Tagesperioden disaggregiert. Die zu verwendenden Zusatzkapazitäten werden durch die einzelnen Produktionssegmente durch die Verwendung von Schichtkalendern realisiert. Die Produktionsmengen sind Eingangsgrößen für die Materialbedarfsplanung. Die Hauptproduktionsprogrammplanung berücksichtigt bei der Ermittlung der Produktionsmengen bereits vorhandene Bestände. Deswegen wird für die Endprodukte keine Nettobedarfsrechnung durchgeführt.

Die Materialbedarfsplanung erfolgt im Simulationssystem wie in der industriellen Anwendung üblich durch die Anwendung des Dispositionsstufenverfahrens in Verbindung mit Losgrößenheuristiken (siehe Herrmann 2011). Die Materialbedarfsplanung wird täglich rollend über ein Planungsintervall von 20 Tagen durchgeführt. Als Losgrößenheuristik wird die Groff-Heuristik (vgl. Herrmann 2011) angewandt. Das Ergebnis der Materialbedarfsplanung sind Planaufträge. Diese Planaufträge werden in Produktionsaufträge umgewandelt, sobald ihr Freigabezeitpunkt erreicht ist und sämtliche Komponenten, die zur Produktion benötigt werden, im Lager in ausreichender Anzahl vorhanden sind. Jeder Produktionsauftrag i (mit $1 \le i \le N$) über eine Menge q_i eines Produkts k_i besitzt einen Freigabezeitpunkt in Periode a_i^{MRP} und einen anzustrebenden Fertigstellungszeitpunkt in Periode f_i^{MRP}. Zur Fertigstellung des Produktionsauftrags i ist die Abarbeitung von einer oder mehreren Operationen notwendig. Jede Operation ist einer oder mehreren Produktionsmaschinen in einem Produktionssegment zugeordnet und besitzt eine Rüstzeit sowie eine Stückbearbeitungszeit.

Wird eine Produktionsmaschine zu einem Zeitpunkt verfügbar, so werden sämtliche startbereite Operationen für diese Maschine gemäß einer Prioritätsregel wie First-In-First-Out priorisiert. Startbereit ist eine Operation dann, wenn sämtliche Vorgängeroperationen abgeschlossen sind. Diejenige Operation mit der höchsten zugewiesenen Priorität wird anschließend bearbeitet. Sind alle Operationen eines Produktionsauftrags abgearbeitet, führt der Produktionsauftrag zu einem Lagerzugang. Der realisierte Fertigstellungszeitpunkt des Produktionsauftrags liegt in Periode F_i^{MRP}.

Im Zuge eines Simulationslaufes über $T^{MRP,Sim}$ bzw. $T^{HPP,Sim}$ Perioden wird die Hauptproduktionsprogrammplanung wöchentlich, also $T^{HPP,Sim}$ mal und die Materialbedarfsplanung täglich, also $T^{MRP,Sim}$ mal durchgeführt. Jede Operation jedes ermittelten Produktionsauftrags wurde durch das Scheduling auf einer Maschine eingeplant und umgesetzt. Anschließend liegen N Produktionsaufträge vor.

3 Ermittlung der Kapazitätsbelastungsfaktoren

Die Produktionsprogrammplanung legt für T Perioden die Produktionsmengen $x_{k,t}$ für K Endprodukte fest. Die Produktion der Endprodukte und aller zugehörigen Vorprodukte erfolgt auf J miteinander vernetzten Produktionssegmenten, die jeweils eine oder mehrere Produktionsmaschinen oder Arbeitsplätze besitzen.

Um die Einhaltung der Kapazitätsgrenzen durch das Produktionsprogramm zu überprüfen, wird die Kapazitätsbelastung durch ein Produktionsprogramm üblicherweise durch sogenannte Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{j,k,z}$ abgeschätzt (siehe Günther und Tempelmeier 2012). Die Kapazitätsbelastungsfaktoren schätzen ab, welche Kapazitätsbelastung aufgrund der Produktion einer Mengeneinheit von $x_{k,t}$ eines Endprodukts k auf einem Produktionssegment j in Periode $t-z$ entsteht. Zur Ermittlung der Kapazitätsbelastungsfaktoren schlagen Günther und Tempelmeier (2012) vor, den Kapazitätsbedarf des Endprodukts und der Vorprodukte je Mengeneinheit den Vorperioden z zuzuordnen. Dabei bleibt offen, wie die Rüstzeiten berücksichtigt werden müssen, die von den gebildeten Losgrößen in der Materialbedarfsplanung abhängen; außerdem wird die zeitliche Verschiebung von Produktionsmengen aufgrund der Ressourcenauslastung sowie der Losbildung vernachlässigt.

In dieser Arbeit wird die Höhe der Kapazitätsbelastungsfaktoren ermittelt, indem die in Simulationsexperimenten tatsächlich auftretenden Kapazitätsbelastungsfaktoren gemessen werden. Da in jeder Periode unterschiedliche Kapazitätsbelastungsfaktoren gemessen werden können, werden periodenspezifische Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t,j,k,z}$ gemessen. Dazu werden den Endprodukt-Produktionsmengen die durch sie verursachten Produktionsaufträge zugeordnet. Die Kapazitätsbelastung durch die Produktionsaufträge wird dann – auf eine Mengeneinheit des Endprodukts bezogen – den Endprodukt-Produktionsmengen zugeordnet. Diese Vorgehensweise wird nachfolgend im Detail beschrieben.

Jedem Produktionsauftrag lässt sich aufgrund der Loszusammenfassung mindestens eine zeitlich disaggregierte Endprodukt-Produktionsmenge $x_{k,t^{MRP}}$ zuordnen. $\theta_i^{x_{k,t^{MRP}}}$ bezeichnet die Menge von Produktionsauftrag i, die durch die Produktionsmenge $x_{k,t^{MRP}}$ verursacht ist.

Die Kapazitätsbelastung $tg_{j,i}$, die aufgrund der Produktion von Produktionsauftrag i im Produktionssegment j entsteht, ist die Summe aller Rüst- und Bearbeitungszeiten, die durch Operationen dieses Produktionsauftrags auf diesem Produktionssegment entstehen. Die Produktion einer Mengeneinheit von

Produktionsauftrag i verursacht damit eine Kapazitätsbelastung von $tg^{l}_{j,i} = \frac{tg_{j,i}}{q_i}$.

Die geplante Kapazitätsbelastung fällt zwischen Freigabetermin a_i und Soll-Fertigstellungstermin f_i an; tatsächlich realisiert wird die Kapazitätsbelastung im Zeitraum zwischen a_i und F_i. Durch die kapazitätsorientierte Planung soll verhindert werden, dass Verspätungen auftreten ($F_i > f_i$). Deswegen muss ein Produktionsprogramm zu erfüllbaren Produktionsaufträgen führen, die geplanten Kapazitätsbelastungen dürfen also nicht zu Kapazitätsüberlastungen führen. Deswegen werden die geplanten Kapazitätsbelastungen zwischen a_i und f_i betrachtet. Der Soll-Endtermin eines Produktionsauftrags kann identisch sein mit dem Freigabetermin seines Nachfolgers. Da dieser Produktionsauftrag deswegen zum Zeitpunkt f_i bereits abgeschlossen sein muss, wird die Kapazitätsbelastung gleichmäßig auf den Zeitraum $[a_i, f_i)$ verteilt. Aufgrund der Terminierung der Produktionsaufträge mit festen, ganzzahligen Vorlaufzeiten D_i und der Modellannahme, dass Bedarfstermine stets zu Periodenbeginn liegen, liegen auch die Freigabe- und Soll-Endtermine stets am Periodenbeginn. Der Zeitraum $[a_i, f_i)$ entspricht deswegen genau $f_i^{MRP} - a_i^{MRP}$ Perioden. Die Kapazitätsbelastung $tg^{l}_{j,t,i}$ aufgrund der Produktion einer Mengeneinheit von Produktionsauftrag i in einer Periode t mit $a_i^{MRP} \le t \le f_i^{MRP} - 1$ ist deswegen die Gesamtbelastung $tg^{l}_{j,i}$ dividiert durch die Anzahl der Perioden $f_i^{MRP} - a_i^{MRP}$.

Die Kapazitätsbelastung $l_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}$, die aufgrund einer Produktionsmenge $x_{k,t^{MRP}}$ und der Kapazitätsbelastung $tg^{l}_{j,t,i^{PO}}$ in Periode $t^{MRP} - z^{MRP}$ in Produktionssegment j entsteht, ist die Summe aller durch die $x_{k,t^{MRP}}$ zugeordneten Produktionsaufträge verursachten Kapazitätsbelastungen in dieser Periode. Die Kapazitätsbelastungsfaktoren beschreiben die Belastung durch eine Produktionsmenge $x_{k,t^{MRP}}$ je Mengeneinheit, deswegen ist $f_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}} = \frac{l_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}}{x_{k,t^{MRP}}}$ der Kapazitätsbelastungsfaktor für Produktionssegment j in Vorlaufperiode z^{MRP} zu $x_{k,t^{MRP}}$.

Zur Produktionsprogrammplanung werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t^{HPP},j,k,z^{HPP}}$ für Wochenperioden benötigt; ermittelt wurden die Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}$ für Tagesperioden. Dazu werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}$ aggregiert. Zunächst werden die Vorlaufperioden dadurch aggregiert, dass die Kapazitätsbelastungen, die in den zu einer Wochenperiode gehörenden Tagen auftreten, aufsummiert werden. Anschließend wird für jede Wochenperiode das mit den Bedarfsmengen $x_{k,t^{MRP}}$ gewichtete Mittel der Tageskapazitätsbelastungsfaktoren gebildet. Für das

beschriebene Testproblem wird die Umsetzung von fünf Produktionsprogrammen über je 20 Wochen simuliert. Aus den Simulationsergebnissen werden die in Abbildung 2 dargestellten, periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren ermittelt; z ist die oben beschriebene Vorlaufperiode, in der die Kapazitätsbelastung anfällt. Die in Tabelle 1 dargestellten Mittelwerte $\mu(f)$ und Standardabweichungen $\sigma(f)$ zu den gemessenen Kapazitätsbelastungsfaktoren zeigen eine signifikante Streuung.

Tabelle 1: *Kennzahlen zu den gemessenen Kapazitätsbelastungsfaktoren in [h]*

		Fräsen		Montage		Feinbearbeitung	
		$\mu(f)$	$\sigma(f)$	$\mu(f)$	$\sigma(f)$	$\mu(f)$	$\sigma(f)$
Endprodukt 1	$z=0$	0,42	0,08	2,13	0,03	0,54	0,11
	$z=1$	2,61	0,07	0,03	0,05	3,30	0,09
	$z=2$	0,02	0,03	0,00	0,00	0,03	0,04
Endprodukt 2	$z=0$	0,30	0,06	2,77	0,20	0,39	0,08
	$z=1$	2,49	0,04	0,37	0,22	3,24	0,06
	$z=2$	0,12	0,07	0,00	0,00	0,15	0,10

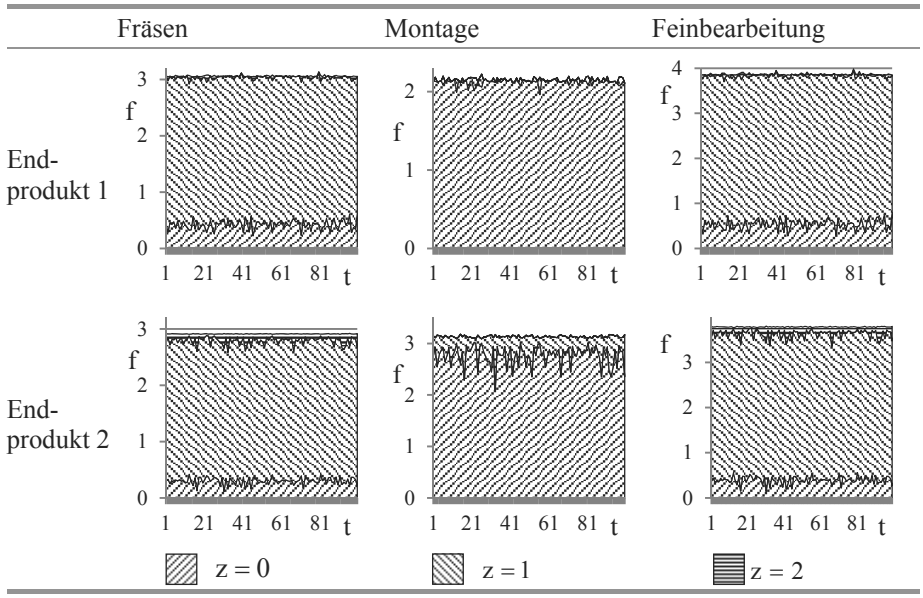


Abbildung 2: *Gemessene periodenspezifische Kapazitätsbelastungsfaktoren f in [h]*

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sowohl die aus einer Mengeneinheit einer Endprodukt-Produktionsmenge resultierende Gesamtbelastung als auch deren Verteilung über die Vorlaufperioden erheblich schwankt.

4 Verbesserung der Kapazitätsabschätzung

Die gemessenen, periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren zeigen, dass die üblicherweise im Rahmen der Produktionsprogrammplanung getroffene Annahme periodenunabhängiger Kapazitätsbelastungsfaktoren nicht zutrifft. Aus diesem Grund ist es plausibel, periodenspezifische Kapazitätsbelastungsfaktoren anzugeben. Eigene Untersuchungen zeigen, dass die Angabe periodenspezifischer Kapazitätsbelastungsfaktoren in der Produktionsprogrammplanung, die bei der Umsetzung des Produktionsprogramms tatsächlich wie geplant auftreten, nur in Ausnahmefällen möglich ist. Deswegen wird die Schwankung der Kapazitätsbelastungsfaktoren als Unsicherheit aufgefasst. Somit liegt ein Optimierungsproblem unter Unsicherheit vor; die Unsicherheit kann durch eine Menge Ω von Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien abgebildet werden. Prinzipiell ist es möglich, Szenarien mit zufällig generierten Kapazitätsbelastungsfaktoren zu verwenden. Diese würden jedoch in der (simulierten) Umsetzung niemals auftreten, da wahrscheinlich kein Produktionsprogramm existiert, das zu dieser zufälligen Folge von Kapazitätsbelastungsfaktoren führt. Deswegen werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren simulativ bestimmt. Eine gemessene Folge von periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren ist ein Szenario. Im Sinne der stochastischen Optimierung (siehe u. a. Kall und Mayer, 2011) ist zu fordern, dass die Kapazitätsrestriktion im Modell HPPLAN für alle Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien der Menge Ω einzuhalten ist. Die dazu notwendige Erweiterung des Modells HPPLAN wird nachfolgend als SK-HPPLAN bezeichnet. Je höher die Anzahl verwendeter Szenarien ist, desto vollständig werden die Schwankungen der Kapazitätsbelastungsfaktoren abgebildet; deswegen führt eine hohe Anzahl verwendeter Szenarien dazu, dass eine Lösung, die die Kapazitätsrestriktion von SK-HPPLAN für alle Szenarien erfüllt, mit großer Wahrscheinlichkeit auch eine tatsächlich zulässige Lösung ist. Gleichzeitig erhöht die Anzahl der Szenarien die Laufzeit zur Lösung des Optimierungsmodells, sodass diese nicht beliebig hoch gewählt werden kann. Eigene Untersuchungen zeigen, dass die Verwendung von 10 Szenarien sowohl zu einer befriedigenden Abbildung der Schwankung der Kapazitätsbelastungsfaktoren als auch zu akzeptablen Laufzeiten führt.

Zur Ermittlung der Szenarien-Menge Ω wird vorab die Durchführung $|\Omega|$ unterschiedlicher Produktionsprogramme simuliert und deren Kapazitätsbelastungsfaktoren gemessen. Für die nachfolgend beschriebene Untersuchung wurden im Vorfeld $|\Omega| = 10$ Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien ermittelt. Anschließend werden zwei Simulationsuntersuchungen durchgeführt. In der ersten Untersuchung, die als Vergleichsmaßstab dienen soll, wird die Produktionsprogrammplanung durch HPPLAN durchgeführt – für die dort verwendeten, periodenunabhängigen Kapazitätsbelastungsfaktoren wurden aus den gemessenen, periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren durchschnittliche Kapazitätsbelastungsfaktoren ermittelt. In der zweiten Untersuchung wird die Produktionsprogrammplanung durch das Modell SK-HPPLAN durchgeführt. In beiden Untersuchungen werden fünf Produktionsprogramme zu jeweils identischen Kundenaufträgen über jeweils 20 Wochen ermittelt und simuliert.

Die Güte der Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung zeigt sich insbesondere in der Verspätung von Produktionsaufträgen. Ist die Kapazitätsabschätzung gut, so treten nur selten Fälle auf, in denen

Kapazitätsengpässe zu verspätet fertiggestellten Produktionsaufträgen führen. Deswegen wird nachfolgend die Güte der Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung an der Verspätung von Produktionsaufträgen gemessen. In Tabelle 2 sind die Anzahlen N der Produktionsaufträge je Produktionsprogramm dargestellt. $V_i^{\#}$ ist die Anzahl der verspätet fertiggestellten Produktionsaufträge von N ($\left|\{i : 1 \le i \le N, V_i > 0\}\right|$). Der Anteil der verspätet fertiggestellten Produktionsaufträge ist $\frac{V_i^{\#}}{N}$. Weiterhin wird der Mittelwert $\mu(V_i)$ und die Streuung $\sigma(V_i)$ der Verspätungen aller Produktionsaufträge angegeben.

Tabelle 2: *Verspätung der Produktionsaufträge*

	HPPLAN					SK-HPPLAN				
Produktionsprogramm	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
N	836	835	844	859	841	824	840	843	851	824
$V_i^{\#}$	93	129	76	91	85	52	42	41	52	63
$\frac{V_i^{\#}}{N}$	0,11	0,15	0,09	0,11	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06	0,08
$\mu(V_i)$	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
$\sigma(V_i)$	0,12	0,13	0,10	0,12	0,10	0,05	0,07	0,06	0,08	0,05

Der Anteil verspäteter Produktionsaufträge sinkt durch den Einsatz von SK-HPPLAN anstelle von HPPLAN um 20 bis 67 %. Der Mittelwert der Verspätung sinkt um 33 bis 67 %. Dieses Ergebnis wird im Folgenden analysiert. Die statischen Kapazitätsbelastungsfaktoren bilden lediglich die mittlere Kapazitätsbelastung ab, die durch die Produktion eines Endprodukts entsteht. Somit ist zu erwarten, dass bei der Realisierung eines durch HPPLAN ermittelten Produktionsprogramms sehr häufig größere Kapazitätsbelastungen verursacht werden, als bei der Planung berücksichtigt. Wenn in einer Periode eine Kapazitätsrestriktion in HPPLAN aktiv ist, und gleichzeitig der zugehörige, gemessene Kapazitätsbelastungsfaktor $f_{t^{HPP},j,k,z^{HPP}}$ größer ist als der in der Planung angenommene ($f_{t^{HPP},j,k,z^{HPP}} > f_{j,k,z^{HPP}}$), dann wurde bei der Realisierung des Produktionsprogramms die Kapazitätsrestriktion verletzt. In der Folge steht in dieser Periode zu wenig Kapazität zur Befriedigung des Produktionsprogramms zur Verfügung; es entstehen verspätete Produktionsaufträge. Die Reduktion der verspäteten Produktionsaufträge bei der Verwendung von SK-HPPLAN anstelle von HPPLAN zeigt, dass die Berücksichtigung der Streuung der Kapazitätsbelastungsfaktoren durch die Verwendung von simulativ ermittelten Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien ein in der Realisierung besser zulässiges Produktionsprogramm erzeugt.

5 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz simulativ ermittelter Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien in der Produktionsprogrammplanung zur verspätungsfreien Abarbeitung der Produktionsaufträge beiträgt und damit die Güte der Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung verbessert. Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Berücksichtigung von Warteschlangeneffekten auf die Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung sowie in der Kombination des vorgestellten Ansatzes zur Berücksichtigung unsicherer Kapazitätsbelastungen mit Ansätzen zur Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheit.

Literatur

Asmundsson J.; Rardin R. L.; Turkseven C. H.; Uzsoy R.: Production planning with resources subject to congestion. Naval Research Logistics 56 (2009), S.142-157.

Byrne M.; Bakir M. A.: Production planning using a hybrid simulation-analytical approach. International Journal of Production Economics 59 (1999), S. 305-311.

Byrne M.; Hossain M.: Production planning: An improved hybrid approach. International Journal of Production Economics 93-94 (2005), S. 225-229.

Drexl, A.; Fleischmann, B.; Günther, H.-O.; Stadtler, H.; Tempelmeier, H.: Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme. Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung 46 (1994).

Günther H.; Tempelmeier H.: Produktion und Logistik. Berlin u.a.: Springer, 2012.

Herrmann F.: Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011.

Hung Y.; Leachman R. C.: A Production Planning Methodology for Semiconductor Manufacturing Based on Iterative Simulation and Linear Programming Calculations. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 9 (1996), S. 257-269.

Kacar N. B.; Irdem D. F.; Uzsoy R.: An Experimental Comparison of Production Planning Using Clearing Functions and Iterative Linear Programming-Simulation Algorithms. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 25 (2012), S. 104-117.

Kall, P.; Mayer, J.: Stochastic linear programming. New York: Springer, 2011.

Kim B.; Kim S.: Extended model for a hybrid production planning approach. International Journal of Production Economics 73 (2001), S. 165-173.

Kurbel, K.: Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. München: Oldenbourg, 2011.

Pahl J.; Voß S.; Woodruff D. L.: Production planning with load dependent lead times: an update of research. Annals of Operations Research 153 (2007), S. 297-345.

Ravindran A.; Kempf K. G.; Uzsoy R.: Production planning with load-dependent lead times and safety stocks for a single product. International Journal of Planning and Scheduling 1 (2011), S. 58-89.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Combining Simulation with Heuristics to solve Stochastic Routing and Scheduling Problems

Kombination von Simulation mit Heuristiken als Lösungsansatz für Stochastic Routing und Scheduling

Angel A. Juan, IN3-Open University of Catalonia, Barcelona (Spain), ajuanp@uoc.edu

Markus Rabe, TU Dortmund, Dortmund (Germany), markus.rabe@tu-dortmund.de

Abstract: Many real-world problems in the production and logistics business are NP-hard even in their deterministic representation, and actually also show stochastic behaviour, where even the mathematical description of the – frequently empirical – distributions is difficult or even impossible. Therefore, an approach is acquired that enables the search for valid and reasonably good solutions under representation of the stochastic system behaviour. A suitable approach is to combine heuristic optimization with simulation techniques. This paper discusses how Monte-Carlo simulation can be combined with heuristics and meta-heuristics in order to efficiently solve such stochastic combinatorial optimization problems. The application is illustrated with examples in two different fields, including logistics and transportation – e.g. vehicle routing problems and inventory problems – as well as manufacturing and production – e.g. scheduling problems.

1 Introduction

There is an emerging interest of introducing randomness into combinatorial optimization problems as a way of describing new real problems in which most of the information and data cannot be known beforehand. This tendency can be observed in Van Hentenryck and Bent (2010), which provides an interesting review of many traditional combinatorial problems with stochastic parameters. Thus, those authors studied Stochastic Scheduling, Stochastic Reservations and Stochastic Routing in order to make decisions on line, i.e., to re-optimize solutions when their initial conditions have changed and, therefore, are no longer optimal. This type of analysis has designed the so-called Online Vehicle Routing Problems, in which re-optimization is needed apart from a previous situation. This set of routing problems seems to be well analyzed with the use of stochastic hypothesis in their definitions (Bent and Van Hentenryck, 2007) providing more reality in their formulation. Another routing field in which randomness has also been developed is the resolution

of inventory routing problems where the product usage is stochastic (Hemmelmayr et al. 2010). Bianchi et al (2009) have written an interesting survey of the appropriate metaheuristics to solve a wide class of combinatorial optimization problems under uncertainty. The aforementioned survey is a good reference for obtaining an appropriate list of articles regarding the use of meta-heuristics for solving Stochastic Combinatorial Optimization Problems (SCOPs) in different application fields.

In this paper we discuss how Monte-Carlo simulation (MCS) can be combined with heuristics and meta-heuristics in order to efficiently solve SCOPs in order to give an overview on the recent progress in this research area. Examples from two application fields illustrate the application of this hybrid methodology.

The paper is structured as follows: Section 2 describes the main ideas behind the generic type of algorithms we propose by combining simulation with heuristics (Sim-heuristic algorithms). Section 3 provides an example of application to SCOPs in the field of logistics and transportation. Likewise, Section 4 reviews an example in the field of manufacturing and production. Finally, Section 5 summarizes the main conclusions of this work.

2 Basic Approach of Sim-heuristic Algorithms

As shown in Figure 1, a Sim-heuristic approach combines combinatorial-optimization methodologies – e.g. heuristics and/or meta-heuristics – with simulation methodologies – e.g. Monte-Carlo Simulation, Discrete Event Simulation (DES), agent-based approaches, etc. – in order to efficiently deal with the two components of a SCOP instance: the optimization nature of the problem and its stochastic nature. In general, this is a simulation-optimization (SimOpt) approach with the simulation as evaluation function of the optimization algorithm (cp. März et al. 2010), which is defined by the German VDI as "Category D" approach (VDI 2013). Some examples of Sim-heuristic applications to different fields can be found in the optimization-simulation literature (Juan et al., 2011a, Peruyero et al. 2011; Gonzalez et al. 2012; Caceres et al. 2012). Typically, given a SCOP instance, a heuristic/meta-heuristic algorithm is run in order to perform an oriented search inside the solution space. This iterative search process aims at finding the feasible solution with the best possible value in the search space, which is expected to be near to the actual optimum as well. During the iterative search process, the algorithm must deal with the stochastic nature of the SCOP instance. One natural way to do this is by taking advantage of the capabilities simulation methods offer to manage randomness. Of course, other approaches can also be used instead of simulation – e.g. dynamic programming, fuzzy logic, etc. However, under the presence of historical data on stochastic behaviour, simulation allows for developing models that are both accurate and flexible. Specifically, randomness can be modelled utilizing a best-fit probability distribution – including parameterization – without any additional assumptions or constraints. Thus, simulation is usually integrated with the heuristic/meta-heuristic approach and it frequently provides dynamic feedback to the searching process in order to improve the final outcome. In some sense, simulation allows for extending existing and highly efficient meta-heuristics – initially designed to cope with deterministic problems – so that they can also be employed to solve SCOPs.

Obviously, one major drawback of this approach is that the results are not expected to be optimal anymore, since Sim-heuristics are combining two approximate

methodologies. Nevertheless, real-life problems are complex enough and usually NP-hard even in their deterministic versions. Therefore, Sim-heuristics constitute a quite interesting alternative for most practical purposes, since they represent relatively simple and flexible methods which are able to provide near-optimal solutions to complex real-life problems in reasonable computing time.

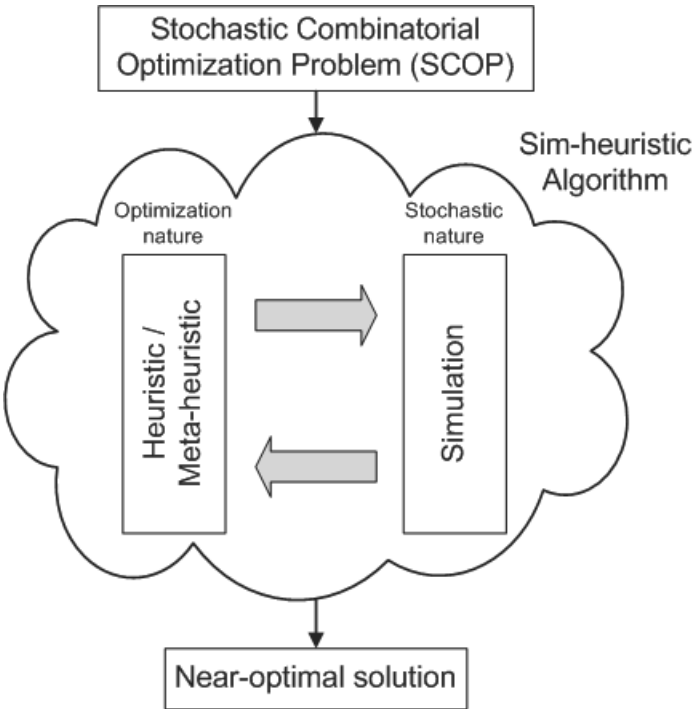


Figure 1: *Overview of the Sim-heuristic approach*

3 Case Example in Logistics and Transportation

The Inventory Routing Problem with stochastic demands (IRPSD) is an NP-hard problem that can be described as follows (Figure 2): consider a Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) (Golden et al. 2008) with *n* nodes or retailing centers (RC), plus the depot. Each RC owns an inventory, which is managed by the central depot. For each RC, the inventory level at the end of a period depends on the initial stock level and also on the end-clients' demands during that period. These end-clients' demands are stochastic in nature. It will be assumed that, for each RC, it has been possible to use historical data to model end-clients' demands through a theoretical or empirical probability distribution. Notice that no particular assumption is made on the type of distribution used to model these demands. Therefore, at the end of each period there might be some costs associated with inventory holding and inventory stock-outs. These costs might be incorporated into the decision-making process and added to the distribution or routing costs, which are usually based on traveling distances and times. At the end of each period, inventory levels are registered by the

RC and updated in the central depot, so that a new routing strategy is defined for the new period taking into account the new data. The goal is to minimize total expected costs (distribution plus inventory-related costs) in each single-period scenario.

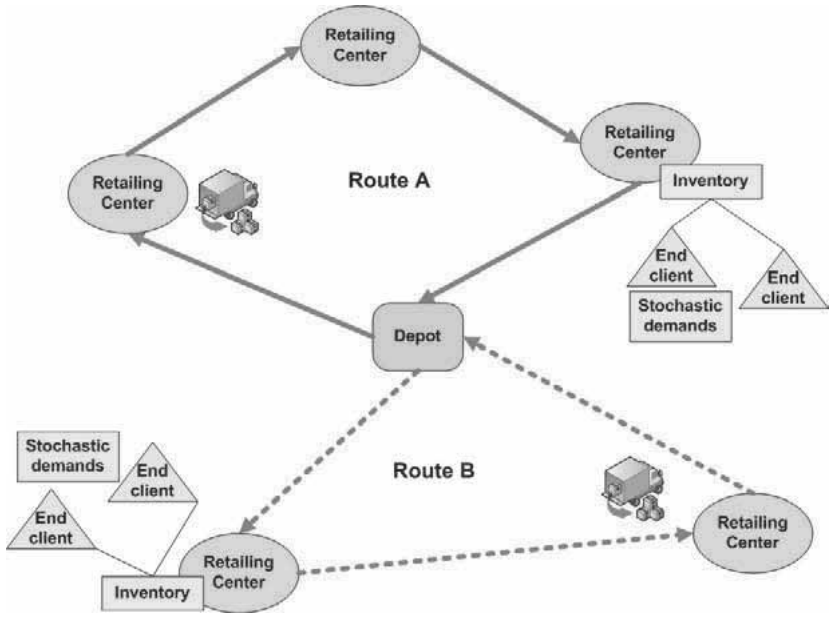


Figure 2: *General scheme of the IRP with stochastic demands*

When properly combined with heuristic techniques, MCS has proved to be extremely useful for solving different routing problems with stochastic demands (Juan et al. 2011a; Gonzalez et al. 2012). In the IRPSD context, Caceres et al. (2012) propose a hybrid approach which also combines MCS with an efficient CVRP heuristic. Specifically, given a customer, the following policies are considered:

1. no refill for that customer;
2. refill up to one quarter of its capacity;
3. refill up to half of its capacity;
4. refill up to three quarters of its capacity; and
5. full refill.

Thus, for each combination of customer-service policy, MCS is used to obtain estimates of the expected inventory costs associated with it, including both surplus and shortage costs. In the second step of the procedure, the authors consider the worst-case scenario from a distribution point of view, i.e., all customers receive a full refill. In this scenario, a fast heuristic is used to obtain a 'good' solution for the associated CVRP. This solution will provide an estimate of the total distribution costs under the full-refill policy. In the third step, they estimate for each customer the routing "marginal savings", i.e., the reduction in distribution costs associated with each non-full-refill policy. In order to do this, a fast heuristic is used again to solve a large set of CVRPs. Once these marginal costs have been estimated, for each customer an

approximated value for the total costs associated with each eligible policy can be obtained by simply adding up estimated routing and inventory costs. Therefore, for each customer, the associated eligible policies can be sorted from lower to higher total costs, thus defining a priority policy rank for each customer. In the fourth step, the 'top' policy for each customer (i.e., the one showing the lowest total cost) is selected, and a pseudo-optimal solution is obtained for the corresponding CVRP by using an efficient algorithm, e.g., the SR-GCWS-CS (Juan et al., 2011b). Finally, in the fifth step, a multi-start process is carried out. At each iteration of this multi-start process, a new policy is randomly selected for each customer and, in a similar way as in the previous step, a new pseudo-optimal solution is obtained for the corresponding CVRP. The best solution found so far is recorded.

After performing an extensive computational test, the authors show that their 'integrated' methodology outperforms the traditional sequential approach, in which each individual inventory level is optimized first and then the resulting vehicle routing problem is solved. Notice that their simulation-optimization approach can consider personalized refill policies for each customer, which contributes to significantly reduce the total costs over other approaches using standard refill policies. Figure 3 shows an example of the routing component of a solution to the IRPSD. In this solution, it can be observed that:

- the routing plan might not necessarily include all customers; and
- the refill policy can be different for each customer (different symbols represent different refill policies).

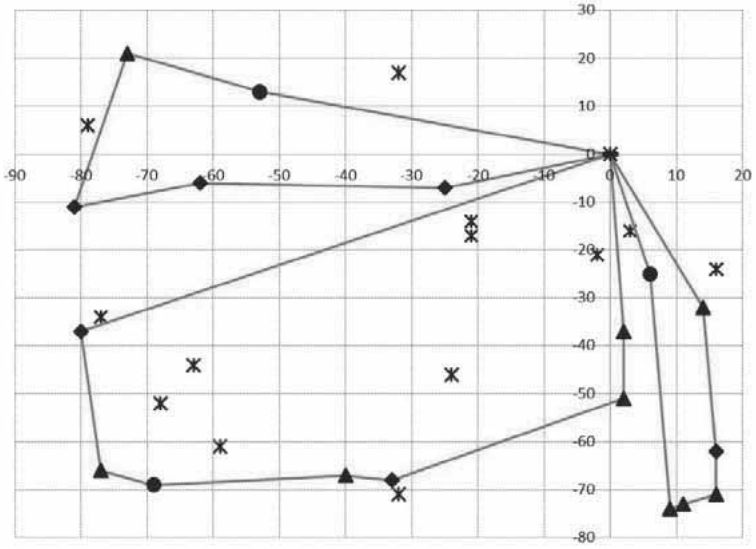


Figure 3: *Visual representation of the routing component of a solution*

4 Case Example in Manufacturing and Production

The Permutation Flow Shop Problem with Stochastic Times (PFSPST) can be seen as a generalization of the classical Permutation Flow Shop Problem (PFSP, Pinedo 1982)

in which the processing time of each job i in each machine j is not a constant value, but instead a random variable, P_{ij}, following a non-negative probability distribution – e.g. Log-Normal, Exponential, Weibull, Gamma, etc. Since uncertainty is present in most real-life processes and systems, considering random processing times represents a more realistic scenario than simply considering deterministic times. As a result, unforeseen circumstances can lead to sudden changes in the processing time of certain jobs in certain machines, which is likely to have noticeable effects on the predicted makespan – i.e., the total completing time (Figure 4). Therefore, one goal that can be considered when dealing with the PFSPST is to determine a sequence of jobs which minimizes the expected makespan or mean time to completion of all jobs. For these problems, simulation-optimization techniques and, in particular, the combination of simulation with meta-heuristics constitutes also a promising approach yet to be explored in its full potential. Figure 4 illustrates a simple PFSP with three jobs and three machines, where O_{ij} represents the operation time of job i in machine j ($1 \leq i \leq 3$, $1 \leq j \leq 3$). Notice that, for a given permutation of jobs, even a single change in the processing time of one job in one machine (O_{21} in this case) can have a noticeable impact on the value of the final makespan.

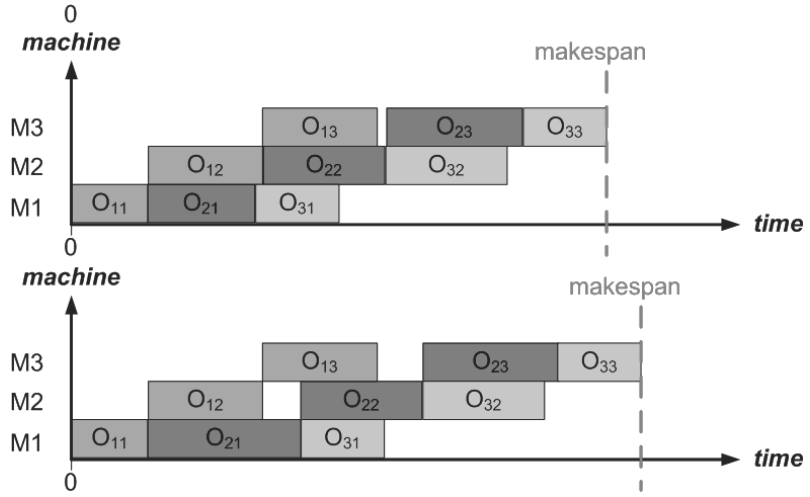


Figure 4: *Variations in makespan due to stochastic processing times*

As with other combinatorial optimization problems, a number of different approaches and methodologies have been developed to deal with the PFSP. These approaches range from complete optimization methods – such as linear and constraint programming – which can provide solutions to small-sized problems, to approximate methods – such as heuristics and meta-heuristics – which can provide near-optimal solutions for medium- and large-sized problems. Moreover, some of these methodologies are able to provide a set of alternative near-optimal solutions from which the decision-maker can choose according to his/her specific preferences. However, the situation with the PFSPST is quite different. In the articles by Gourgand et al. (2005), Dodin (1996), Honkomp et al. (1997), and Baker and Altheimer (2012), simulation-based techniques have been used to get results for the PFSPST. In most of

these articles, though, assumptions are made about the probability distributions employed to model processing times – e.g. Normal or Exponential – or about the restricted size of the instances being analysed. Nonetheless, in a real-life scenario, the specific distributions to be used will have to be fitted from historical data (observations) leading to empirical distributions. The assumption of processing times following a Normal distribution is, in our opinion, quite unrealistic and restrictive, since distributions such as the Log-normal or the Weibull are usually much better candidates to model processing times with positive values.

Thus, Peruyero et al. (2011) propose a simulation-optimization algorithm described next for solving the PFSPST. The main idea behind their approach is to transform the initial PFSPST instance into a PFSP instance and then to obtain a set of near-optimal solutions for the deterministic problem by using an efficient PFSP algorithm. The transformation step is achieved by simply considering the expected value of each stochastic processing time in the PFSPST as the constant processing time in the PFSP. Since any PFSP solution will be also a feasible PFSPST solution, it is possible to use Monte Carlo simulation to obtain estimates for the expected makespan. That is, it is possible to obtain these estimates by iteratively reproducing the stochastic behaviour of the processing times in the sequence of jobs given by the PFSP solution. Of course, this simulation process will take as many iterations as necessary to obtain accurate estimates. Simulation is used here to determine which solution, among the best-found deterministic ones, shows a lower expected makespan when considering stochastic times. This strategy assumes that a strong correlation exists between near-optimal solutions for the PFSP and near-optimal solutions for the PFSPST: Good solutions for the PFSP are likely to represent good solutions for the PFSPST. However, not necessarily the best-found PFSP solution will become the best-found PFSPST solution, since its resulting makespan might be quite sensitive to variations in the processing times. If there are indications for such as sensitivity, specific sensitivity studies could help to validate the results or at least to become aware of the dimension of uncertainly applied (cp. Rabe et al. 2010).

As the authors conclude, their approach offers a practical perspective which is able to deal with more realistic scenarios: by integrating Monte Carlo simulation in the methodology, it is possible to naturally consider any probabilistic distribution for modelling the random job processing times.

5 Conclusions and Outlook

In this paper, we have discussed how Monte-Carlo simulation can be combined with meta-heuristics in order to develop hybrid algorithms able to solve complex stochastic combinatorial optimization problems. The general scheme of these 'sim-heuristic' algorithms has been introduced, and some examples of applications to different fields have been described. These examples include stochastic versions of the well known inventory routing problem as well as the flow-shop problem. This work has focused on Monte-Carlo simulation, only. However, other types of simulation –e.g. discrete-event simulation– can be also hybridized with meta-heuristic approaches to solve complex optimization problems of stochastic nature in which the time factor must be also considered. As an example, current studies are extended to the problem of mid-term scheduling of production under relaxed constraints, e.g. with algorithms that allow for changing the factory's capabilities and capacities for the future. Such an

approach leads to so-called 'changing steady state' systems that show a high complexity with respect to the high number and diversity of relationships. DES seems a good candidate to approach this kind of problems in a combination with heuristic algorithms (cp. Rabe and Deininger 2013).

Acknowledgement

This work has been partially supported by the Spanish Ministry of Science and Innovation (TRA2010-21644-C03). It has been developed in the context of the IN3-ICSO program and the CYTED-HAROSA network (http://dpcs.uoc.edu).

References

Baker, K.R.; Altheimer, D.: Heuristic solution methods for the stochastic flow shop problem. European Journal of Operational Research, 216 (2012), pp. 172-177.

Bent, R.; Van Hentenryck, P.: Waiting and relocation strategies in online stochastic vehicle routing. In: Proceedings of the Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (2007), pp. 1816-1821, Hyderabad, India.

Bianchi, L.; Dorigo, M.; Gambardella, L.M.; Gutjahr, W.J.: A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. Natural Computing: an International Journal 8 (2009) 2, pp. 239-287.

Caceres, J.; Juan, A.; Grasman, S.; Bektas, T.; Faulin, J.: Combining Monte-Carlo Simulation with heuristics for solving the inventory routing problem with stochastic demands. In: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (2012), pp. 1-9.

Dodin, B.: Determining the optimal sequences and the distributional properties of their completion times in stochastic flow shops. Computers and Operations Research, 23 (1996), pp. 829-843.

Golden, B.; Raghavan, S.; Wasil, E. (Eds.): The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges. New York: Springer 2008.

Gonzalez, S.; Juan, A.; Riera, D.; Elizondo, M.; Fonseca, P.: Sim-RandSHARP: A Hybrid Algorithm for solving the Arc Routing Problem with Stochastic Demands. In: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (2012), pp. 1-11.

Gourgand, M.; Grangeon, N.; Norre, S.: Markovian analysis for performance evaluation and scheduling in m machine stochastic flow-shop with buffers of any capacity. European Journal of Operational Research, 161 (2008), pp. 126-147.

Hemmelmayr, V.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.; Savelsbergh, M.W.P.: Vendor Managed Inventory for Environments with Stochastic Product Usage. European Journal of Operational Research 202 (2010), pp. 686-695.

Honkomp, S.J.; Mockus, L.; Reklaitis, G.V.: Robust scheduling with processing time uncertainty. Computers and Chemical Engineering 21 (1997), pp. 1055-1060.

Juan, A.; Faulin, J.; Grasman, S.; Riera, D.; Marull, J.; Mendez, C.: Using safety stocks and simulation to solve the vehicle routing problem with stochastic demands. Transportation Research Part C 19 (2011a), pp. 751-765.

Juan, A.; Faulin, J.; Jorba, J.; Riera, D.; Masip; D.; Barrios, B. On the use of Monte Carlo Simulation, cache and splitting techniques to improve the Clarke and Wright savings heuristics. Journal of the Operational Research Society 62 (2011b) 6, pp. 1085-1097.

Peruyero, E.; Juan, A.; Riera, D.: A hybrid algorithm combining heuristics with Monte Carlo simulation for solving the stochastic flow shop problem. In Proceedings of the 2011 ALIO/EURO Workshop (2011), pp. 127-130. Porto, Portugal. May 4-6.

Pinedo, M.: Minimizing the expected makespan in stochastic flow shops. Operations Research, 30 (1982), pp. 148-162.

Rabe, M.; Deininger, M.: Modelle für Job-Shop-Scheduling-Algorithmen in Changing-Steady-State-Systemen. Submitted for the 15th ASIM Conference on Simulation in Production and Logistics, Paderborn, October 2013.

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verification and validation for simulation in production and logistics. Simulation News Europe 19 (2010) 2, pp. 21-29.

Van Hentenryck, P., Bent, R.: Online Stochastic Combinatorial Optimization. Boston: The MIT Press 2010.

Verein Deutscher Ingenieue (VDI): Richtlinie 3633 Blatt 12 “Simulation und Modellierung – Simulation und Optimierung”. In preparation for green print, Berlin: Beuth 2013.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Wertstromorientierte Konfiguration der Produktionssteuerung durch webbasierte Simulation

Value Stream Oriented Configuration of Production Control by web-based Simulation

Günther Schuh, Till Potente, Annika Hauptvogel, Christina Thomas, Christiane Müller, Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen, Aachen (Germany),
g.schuh@wzl.rwth-aachen.de, t.potente@wzl.rwth-aachen.de,
a.hauptvogel@wzl.rwth-aachen.de, c.thomas@wzl.rwth-aachen.de,
ch.mueller@wzl.rwth-aachen.de

Abstract: The production supervisor is faced with the challenge of dynamic and complex production structures. In this environment it is even more important to concentrate on production planning and control. Simulation is a tool to handle the dynamics and complexity of production processes and to configure the production planning and control. Today, the generation and configuration of simulation models require expert knowledge. The presented approach explains, how simulation models can be generated in a short period of time and without expert knowledge via a web-based platform. With the generated simulation models different configurations of production control can be applied in the simulation. The results of each simulation serve as a basis for future decisions of the production supervisor.

1 Einführung

Das wichtigste Ziel produzierender Unternehmen ist die Erreichung einer hohen Liefertermintreue (Schuh und Stich 2011, S. 16-17). Hierzu müssen aktuelle Anforderungen, wie Wandlungsfähigkeit, Automatisierung und Flexibilisierung, an die Produktion erfüllt werden (Abele und Reinhart 2011, S. 130–148). Die dadurch steigende Komplexität in der Planung von Produktionsprozessen zu beherrschen, während die Transparenz der Produktionsprozesse stark abnimmt, ist die Herausforderung für eine erfolgreiche Produktionsplanung und -steuerung (PPS) in der Zukunft. Der vermehrte Einsatz von IT-Systemen zur Unterstützung der PPS in den letzten Jahren konnte diese Anforderungen nicht bewältigen (Schuh et al. 2011). Gründe hierfür sind die eingeschränkte Reaktionsfähigkeit der Systeme auf Änderungen in den dynamischen Produktionssystemen sowie die intransparente Planung dieser Systeme, deren Ergebnisse für den Anwender nur eingeschränkt

nachvollziehbar sind. In der Praxis beruht dieser Planungsprozess häufig auf dem impliziten Wissen des Fertigungssteuerers. Die Simulation als Werkzeug zur Unterstützung bei Entscheidungen wird allerdings kaum eingesetzt. In diesem Artikel wird ein Ansatz dargestellt, mit dem durch Simulationstechnik auch ohne entsprechendes Expertenwissen die Konfiguration der PPS verbessert werden kann.

2 Stand der Technik

Die Voraussetzung von Expertenwissen zur Implementierung von Simulationsmodellen stellt eine Hürde der Anwendung von Simulationen als Entscheidungsunterstützung dar. Um dieser Herausforderung zu begegnen werden Ansätze zur automatischen Modellgenerierung entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden.

Bei der automatischen Modellgenerierung werden Simulationsmodelle über Schnittstellen und Algorithmen aus externen Datenquellen generiert (Straßburger et al. 2010, S.37 f.). Hierzu sind keine manuellen Eingriffe durch einen Experten erforderlich und kein Expertenwissen über die jeweilige Simulationssoftware notwendig. Bei der automatischen Modellgenerierung liegt das größte Potenzial in der Zeiteinsparung bei der Erzeugung eines Simulationsmodells und damit einhergehend auch bei der Durchführung von Simulationsexperimenten (Bergmann 2011, S. 9). Die somit gewonnene Zeit kann für die sich an die Simulationsexperimente anschließende Analyse genutzt werden. Bei der teilautomatisierten Modellgenerierung, bei der ein Experte aus dem Bereich der Simulation benötigt wird, kann der Fokus auf die Optimierung des Modells gelegt werden (Bracht 2008, S.444). Neben der Zeitersparnis liegt ein weiteres Potenzial der automatischen Modellgenerierung in ihrem Einsatz für die betriebsbegleitende Simulation (Selke 2008, S.21).

Beim Aufbau von Simulationsmodellen wird zwischen planungsbegleitenden und betriebsbegleitenden Simulationen unterschieden. Im Gegensatz zur planungsbegleitenden Simulation unterstützt die betriebsbegleitende Simulation bei der kurzfristigen Steuerung und der Überwachung der zuvor erstellten Planung (z. B. durch planungsbegleitende Simulation). Gegenstand von aktuellen Forschungsarbeiten sind vor allem hybride Lösungen (Bergmann 2011, S.10; Straßburger et al. 2010, S.41). Betriebsbegleitende Simulationen tragen dazu bei, die Komplexität der Produktionsplanung und -steuerung zu beherrschen. Jedoch sind sie durch die notwendigen, anhaltenden Aktualisierungen aufwendig und kostenintensiv. Durch den Einsatz der automatisierten Modellierung lässt sich die Effizienz derartiger Simulationen erheblich steigern (Selke 2008, S.21). Hierzu werden aktuelle Daten aus der Produktion über ERP-/ PPS- und MES-Systeme, wie zum Beispiel BDE-Daten (Betriebsdatenerfassung), herangezogen. Die Anbindung betrieblicher Informationssysteme (z. B. BDE-Systeme) ist ein zentraler Bestandteil der automatischen Modellgenerierung (Selke 2008, S.29 f.), um die Modelle in möglich kurzen Zeitabständen mit aktuellen Informationen zu versorgen und somit die Aktualität der Modelle und die Zuverlässigkeit ihrer Ergebnisse zu sichern. Die automatische Verwendung von PPS- oder ERP-Systemen als Datenquelle kann aber dazu führen, dass falsche Daten zur Generierung von Modellen genutzt werden, da diese nicht mehr manuell überprüft werden. Eine automatische Übernahme von

Daten ist lediglich bei sorgfältiger Definition und Durchführung von Plausibilitätsprüfungen sinnvoll (Rabe et al., S. 132).

Die Herausforderung bei der automatischen Generierung von Simulationsmodellen ist die Sicherstellung der Qualität der verwendeten Daten. Neben ihrer Korrektheit ist auch die Form, in der die Daten zur Generierung verwendet werden, zu gewährleisten (Rabe et al. 2008, S. 132). Qualitativ hochwertige und zugleich vollständige Daten werden für die automatische Modellgenerierung zwar vorausgesetzt, sind häufig aber nicht verfügbar. Dies führt zu einem erhöhten Aufwand in der Verifikation und Validierung des generierten Modells. Während einer automatischen Generierung ist das Risiko höher, Fehler in den Daten nicht zu erkennen (Rabe et al. 2008, S. 131). Müller-Sommer et al. (2010, S.61-63) nennen beispielsweise die Plausibilisierung der Daten und Schaffung von Ersatzwerten als einen geeigneten Lösungsansatz.

Neben der zum Teil fehlenden Qualität der aus der Produktion gewonnenen Daten fehlt die Semantik der Daten. Um ein Simulationsmodell basierend auf Rückmeldedaten aus der Produktion zu generieren, gilt es zunächst, „Wissen“ aus diesen Daten zu gewinnen, das anschließend in das Modell implementiert wird. Beispielhaft ist an dieser Stelle die Identifikation von Steuerungsstrategien zu nennen. Bergmann (2011, S.14) gibt zwei Methoden an, mit denen Steuerungsstrategien aus Daten extrahiert werden können:

- Funktionsapproximation über künstliche neuronale Netze und
- Mustererkennung mittels z. B. Data Mining

Trotz der Herausforderungen in der automatischen Modellgenerierung kann mit der teilautomatisierten Modellgenerierung bereits heute das komplexe Verhalten realer Systeme hinreichend genau abgebildet werden (Straßburger 2010, S. 40). Hierbei wird häufig auf Modellbausteine zurückgegriffen, mit denen das Simulationsmodell aufgebaut wird. Die verbleibende Feinmodellierung erfolgt manuell durch einen Simulationsexperten.

Bildet ein Simulationsmodell die reale Situation in der Produktion hinreichend genau ab und werden mit diesem Modell Simulationsexperimente durchgeführt, die auf die Realität übertragbar sind, fehlt es heute noch an den entsprechenden Möglichkeiten, die Simulations(ergebnis)daten zurückzuspielen und für den Anwender bereit zustellen (Straßburger et al. 2010, S.43; Bergmann 2011, S.15).

In der Literatur werden zahlreiche Ansätze zur automatischen Modellgenerierung betrachtet (vgl. Bergmann 2011; Jensen 2007; Robertson und Perera 2001; Selke 2005). Jedoch können diese noch nicht vollständig ohne Expertenwissen im realen Produktionsumfeld angewendet werden.

3 Ansatz

Wie eingangs erläutert ist die PPS sehr komplex und dennoch das zentrale Element zur Erreichung der logistischen Ziele eines Unternehmens (u. a. Termintreue). Zu ihren Aufgaben gehören die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung (Lödding 2008). Basierend auf diesem Modell der Fertigungssteuerung nach Lödding hat Schuh das Konzept der Wertstromorientierten Produktionssteuerung (WoPS, siehe Abbildung 1) entwickelt.

Im Gegensatz zu anderen Ansätzen integriert der WoPS-Ansatz die Logik der Produktionssteuerung von Lödding (Schuh et al., 2010).

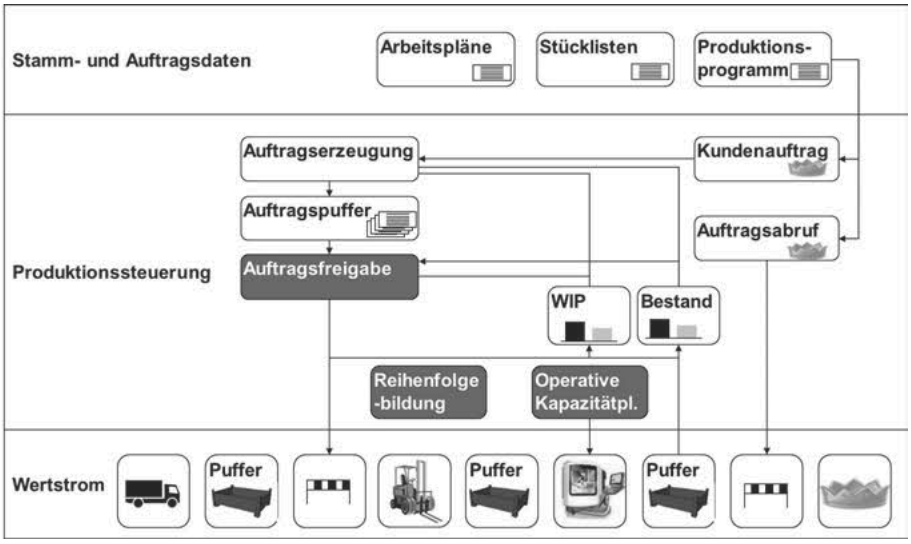


Abbildung 1: *Drei Ebenen der Wertstromorientierten Produktionssteuerung*

Um Auswirkungen von Änderungen in der Konfiguration der drei Aufgaben für den Fertigungssteuerer darstellen zu können, soll der theoretische WoPS-Ansatz in eine Web-Plattform integriert werden (WoPS+). Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Konfiguration der PPS sind enorm und ihre jeweiligen Auswirkungen auf die Produktion für den Menschen zu komplex, um sie vorherzusagen. Ziel des WoPS+-Ansatzes ist es, dem Anwender (z. B. Fertigungssteuerer) eine Grundlage zu bieten, mit der er verschiedene Konfigurationen der PPS seiner Produktion anhand einer Simulation testen kann, ohne dabei das Expertenwissen für die Implementierung einer Simulation mitbringen zu müssen. Die Ergebnisse der Simulationsläufe dienen dem Anwender dann als Entscheidungsgrundlage und somit zu einer Optimierung der Konfiguration seiner PPS.

4 Vorgehen und Ergebnisse

Das von Schuh definierte Modell zur Wertstromorientierten Produktionssteuerung wurde am Lehrstuhl für Produktionssystematik des WZL der RWTH Aachen angewendet, um eine Simulationsplattform zu entwickeln, die den Fertigungssteuerer bei der Konfiguration der PPS unterstützt. Dies wird ermöglicht durch die Abbildung einer bestehenden Produktion in einem Simulationsmodell basierend auf den Rückmeldedaten aus der Produktion. Dies wurde in der webbasierten Simulationsplattform WoPS+ umgesetzt. Der Anwender (i. e. der Fertigungssteuerer) arbeitet über eine Weboberfläche und kommt nicht mit der Simulation in Berührung. Dies unterscheidet den WoPS+-Ansatz von bestehenden Ansätzen. Das Vorgehen zur webbasierten, wertstromorientierte Konfiguration und

Simulation der Produktionssteuerung wird im Folgenden erläutert und ist in Abbildung 2 dargestellt.

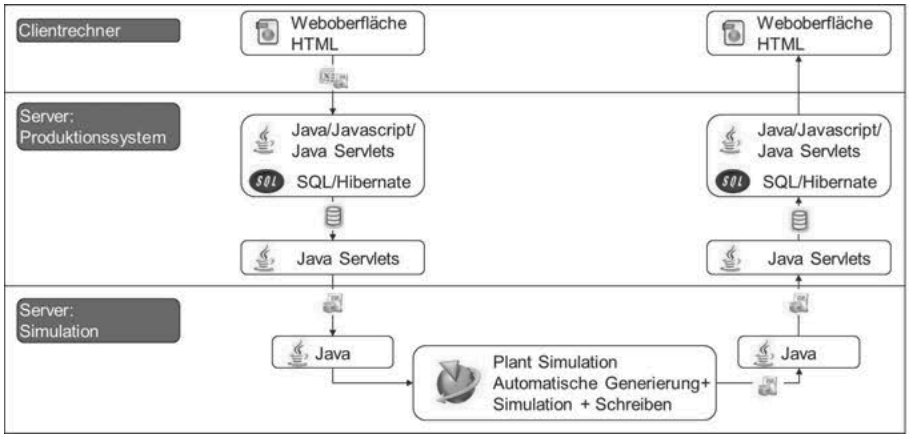


Abbildung 2: *Ablauf eines Simulationslaufs mit WoPS+*

Über die Weboberfläche kann der Anwender Stamm- und Rückmeldedaten aus der Produktion im csv-Format hochladen. Diese kann er aus dem ERP-System gewinnen. Die im ERP-System abgefragten Daten müssen für das Hochladen auf der Weboberfläche in ein einheitliches Format gebracht werden. Die manuelle Aufbereitung der Daten aus dem ERP-System ist bisher nicht automatisiert. Zu den benötigten Daten zählen:

- Fertigungsaufträge (Auftragsnummer, Materialbeschreibung, Menge)
- Arbeitspläne (Vorgangsnummer, Rüstzeit, Hauptzeit, Arbeitsplatz, Startzeitpunkt)
- Maschinen (Arbeitsplatznummer, Maschinenbezeichnung, Kapazität)

Die drei genannten Dateien werden dann als zip-Datei in die Datenbank übertragen. In der Weboberfläche wird das geladene Szenario dargestellt und kann nun entlang des Wertstroms konfiguriert werden. Zu den Konfigurationsmöglichkeiten zählen die Aufgaben der Produktionssteuerung nach Lödding (siehe auch Ebene 2 der Wertstromorientierten Produktionssteuerung in Abbildung 1):

- Reihenfolgebildung,
- Auftragsfreigabe und
- Kapazitätsplanung.

Zudem kann der Zeitraum des Simulationslaufs ausgewählt werden. Die entsprechende Oberfläche wird in Abbildung 3 gezeigt.

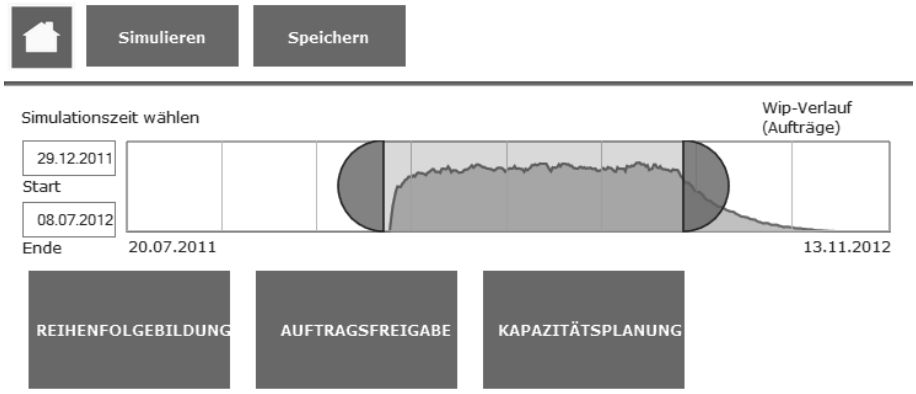


Abbildung 3: *Konfigurationsmöglichkeiten in der Weboberfläche der WoPS+-Plattform*

In Abbildung 4 ist beispielhaft die Oberfläche zur Konfiguration der Reihenfolge dargestellt. Hier sind alle Arbeitsplätze, die in der betrachteten Produktion zur Verfügung stehen, aufgeführt und ihrem jeweiligen Bereich (z. B. Öfen, Kontrolle) zugeordnet. Die Größe der abgebildeten Fläche gibt an, wie hoch die Belastung der Maschine ist. Der Anwender kann nun die Reihenfolgebildung jeder einzelnen Maschine entlang des Wertstroms definieren. Die Konfiguration der Reihenfolgebildung erfolgt mittels FIFO (First In - First Out), KOZ (kürzeste Operationszeit), LOZ (längste Operationszeit), LIFO (Last In - First Out), Rüstzeitoptimiert, Schlupf oder frühester Plan-Starttermin. Zur Steuerung der Auftragsfreigabe kann zwischen ConWIP (Constant Work-In-Process), Rückwärtsterminiert, ursprünglicher Termin aus dem ERP-System und ASAP („As Soon As Possible“) gewählt werden. Für die Kapazitätsplanung kann ein Schichtmodell sowohl für die Mitarbeiter als auch die Maschinen konfiguriert werden.

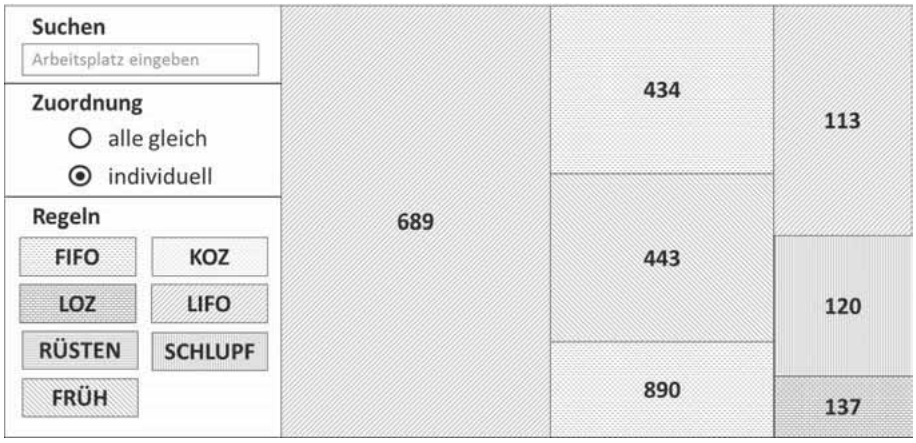


Abbildung 4: *Reihenfolgebildung in der Weboberfläche der WoPS+-Plattform*

Nachdem die Produktionssteuerung konfiguriert ist, werden die gewählten Parameter sowie die Eingabedaten in Dateien geschrieben und danach gezippt. Diese Datei wird anschließend an den Simulationsserver übertragen. Hier wird das Simulationsmodell mithilfe der Software Plant Simulation der Siemens AG generiert. Dieses bildet den realen Produktionsablauf ab. Die Generierung des Modells erfolgt dabei ohne weitere Implementierung durch den Anwender. Entsprechend der Daten werden automatisch die Maschinen und die Steuerungsmodule aus einem Baukasten zusammengestellt und parametrisiert.

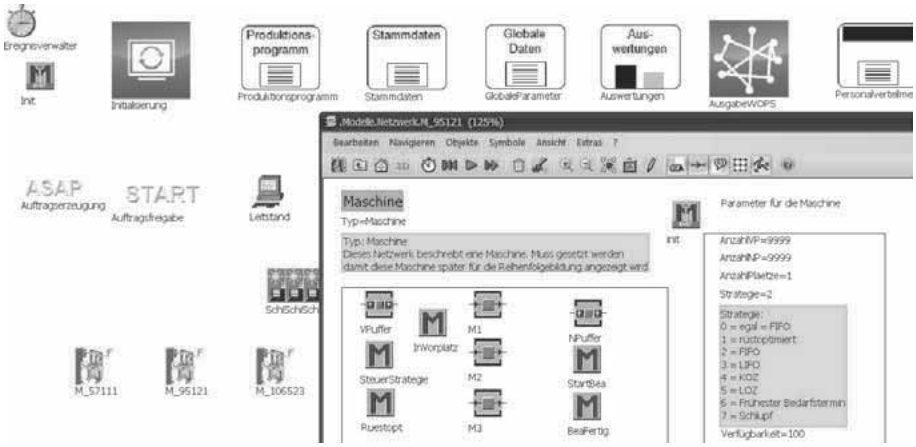


Abbildung 5: *Automatisch generiertes Simulationsmodell in Plant Simulation*

Ist das Simulationsmodell erfolgreich implementiert, so erfolgt ein Simulationslauf. Die Ergebnisse der Simulation werden in csv-Dateien exportiert und gezippt. Diese Datei wird zum Produktionssystem-Server übertragen, in die Datenbank eingelesen und abschließend werden mithilfe von Java Servlets und Javascript die Ergebnisse

auf dem Clientrechner mit HTML dargestellt. Hier kann der Anwender die Ergebnisse betrachten und den Einfluss der einzelnen Konfigurationen auf die Produktion analysieren. Verschiedene Simulationsszenarien können hier direkt anhand der logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Termintreue, Auslastung sowie Bestand miteinander verglichen werden. Durch die Wahl des Zielkorridors sind so die erfolgreicheren Einstellungen der Steuerungsparameter erkennbar.

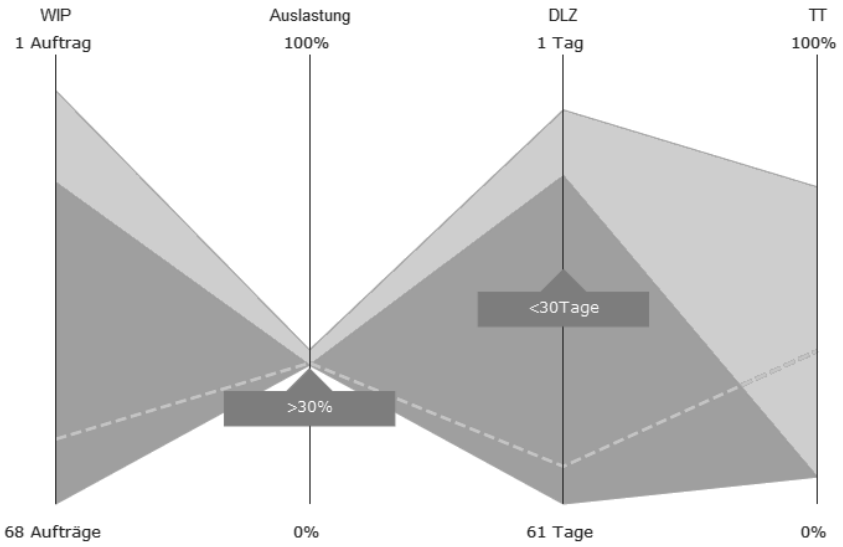


Abbildung 6: *Potenzial der Steuerungsparameter*

Da die Produktion ein dynamisches System ist und sich die Rahmenbedingungen ständig ändern, kann eine optimale Konfiguration schnell überholt sein. Es ist daher notwendig, die Konfiguration regelmäßig zu überprüfen und anzupassen. Die Simulation bietet die Möglichkeit, vorausblickend die Grenzen der Steuerungslogik zu untersuchen. Ein typischer Datensatz einer realen Einzel- und Kleinserienproduktion nach dem Werkstattprinzip umfasst beispielsweise für einen Zeitraum von 6 Monaten 180 Maschinen, 10.000 Aufträge und durchschnittlich 7 Prozessschritte. Mithilfe der WoPS+-Plattform können die Daten einfach in ein Simulationsmodell überführt werden und in kürzester Zeit die Auswirkungen von verschiedenen Konfigurationen der PPS überprüft werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der in diesem Artikel präsentierte Ansatz zur simulationsbasierten, wertstromorientierten Produktionssteuerung trägt zu einer höheren Transparenz der Produktionsabläufe bei. Es wird möglich, in kurzer Zeit verschiedene Konfigurationen der PPS anhand von Simulationen webbasiert zu testen. Die Ergebnisse unterstützen den Fertigungssteuerer kurzfristig bei seinen Entscheidungen. Durch den Einsatz einer Visualisierungsebene wird der Mensch als

Entscheider optimal bei der Planung und Steuerung der Produktion unterstützt. Die Effizienz der PPS wird somit gesteigert. Durch das stetige Zusammenführen der digitalen und realen Welt wird die zunehmende Dynamik und Komplexität beherrschbar (Schuh et al. 2013a).

Gleichzeitig stellt die Aufbereitung der aus den eingesetzten Systemen (z. B. ERP-System) gewonnenen Daten den höchsten Zeitaufwand dar. Die Inkonsistenzen eines Datensatz aus der Einzel- und Kleinserienproduktion nach dem Werkstattprinzip liegen beispielsweise bei mindestens 10% bei drei von vier analysierten Unternehmen (Schuh et al. 2013b). Zu den Inkonsistenzen zählt Schuh unter anderem die fehlende Angabe eines Arbeitsplatzes sowie eines Start- und/ oder Endzeitpunktes der Bearbeitung. Um die Güte der Simulationsergebnisse zu erhöhen und ihre Aussagekräftigkeit zu steigern, gilt es, die Konsistenz der eingelesenen Daten sicherzustellen. Der Fokus der weiteren Arbeiten in WoPS+ liegen daher vor allem auf einer automatischen Aufbereitung der Daten mittels dem sogenannten Association Rule Induction. Somit soll sichergestellt werden, dass die Daten, mit denen die Simulationsmodelle erzeugt werden, konsistent sind und die Entscheidungen, die basierend auf den Simulationsergebnissen getroffen werden, zuverlässig sind.

Danksagung

Der Ansatz der webbasierten Simulationsplattform zur Wertstromorientierten Produktionssteuerung wird vom Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen im Rahmen der Exzellenzcluster Initiative "Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer" (gefördert von der DFG) entwickelt.

Literatur

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München: Carl Hanser Verlag 2011, S. 130–148.

Bergmann, S.: Automatische Generierung adaptiver und lernfähiger Modelle zur Simulation von Produktionssystemen Technische, Universität Ilmenau, 2011.

Bracht, U.; Rooks, T.; Adrian, R.: Virtuelle Logistikplanung für die Montage im Rahmen der Digitalen Fabrik. In Advances in Simulation for Production and Logistics Applications, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2008.

Jensen, S.: Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionssystemen am Beispiel einer Job Shop Fertigung. Dissertation Universität Kassel, kassel university press, 2007.

Lödding, H.: Verfahren der Produktionssteuerung. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

Müller-Sommer, H.; Strassburger, S.: Methoden zur Plausibilisierung von Eingangsdaten für Belieferungssimulationen in Logistik-Planungssystemen der Digitalen Fabrik. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 61-68.

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

Robertson, N H.; Perera, T.: Feasibility for automatic data collection. In: Peters, B. A.; Smith, J. S.; Medeiros, D. J.; Rohrer, M. W. (Hrsg.): Proceedings of the 33nd conference on Winter simulation: Arlington, Virginia, IEEE Computer Society, 2001, S. 984–990.

Schuh, G.; Lödding, H.; Stich, V.; Reuter, C.; Schmidt, O.; Potente, T. et al. (2011): High Resolution Production Management. In: Christian Brecher, Fritz Klocke, Robert Schmitt und Günther Schuh (Hg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2011. 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker, 2011, S. 2.

Schuh, G; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A. (2013a) High Resolution Production Management. In: wt Werkstattstechnik online, Düsseldorf, 103 (2013) 2, S. 96-99.

Schuh, G; Kampker, A.; Potente, T.; Stollwerk, A.; Müller, C.: Wertstromorientierte Konfiguration der Produktionssteuerung mit Enterprise Dynamics. In: Zülch, G. (Hg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. 14. Fachtagung der Arbeitsgemeinschaft Simulation; ASIM-Fachtagung "Simulation in Produktion und Logistik". Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 413–420.

Schuh, G.; Stich, V.: Produktion am Standort Deutschland. Aachen: Druckservice Zillekens, 2011, S. 16-17.

Schuh, G.; Potente , T.; Thomas , C.; Brambring, F. (2013b) Approach for Reducing Data Inconsistencies in Production Control. In: CARV, 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production. München, 6. bis 9. Oktober 2013, im Erscheinen.

Selke, C.: Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung, Dissertation, Technische Universität München, 2005.

Straßburger, S.; Bergmann, S.; Müller-Sommer, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Interaktives Montageplanungssystem zur Online-Leistungssteuerung

Interactive assembly planning system for online performance control

Lothar März, STREMLER AG, Lindau (Germany), lothar.maerz@stremler.de

Abstract: This paper presents a simulation-based planning software that is developed for online performance control in assembly lines within the plant construction business. The software is foreseen in assembly lines with sequenced production lines and assembly stations, but will be also employable in other industries with a sufficiently high number of different products and variants. The solution enables the planner to change the configuration in an interactive manner, which means the changes were simulated within a few seconds as it were online. To this end, the software periodically collects process times, sequence and feature data of products and production. A web-based user interface enables to set and change reference data, define process simulations and allows running different simulations scenarios.

1 Planung der Montage

1.1 Stufen der Planung

Zur effizienten Produktion von Anlagen ist eine hierarchische, aufeinander abgestimmte und durchgängige Planung notwendig. Die Abstimmung der Marktanforderungen mit den vorhandenen Kapazitäten erfolgt anhand einer hierarchischen Planung, die in Abhängigkeit von Planungshorizont und verfügbaren Planungsinformationen je Planungsstufe versucht, Engpässe zu identifizieren und Maßnahmen bei Planabweichungen zu bewirken (Minichmayr et al. 2011). In Abbildung 1 sind die Planungsstufen mit exemplarischen Zeithorizonten und Aufgaben aufgezeigt. Mit abnehmendem zeitlichem Abstand zur Ausführung nimmt die Konkretisierung der Planung zu und mündet in eine operative Steuerung der Fertigung und Montage. Das vorgestellte interaktive Montageplanungssystem fokussiert auf die Kurzfristplanung sowie der Steuerung der Montage im Anlagenbau.

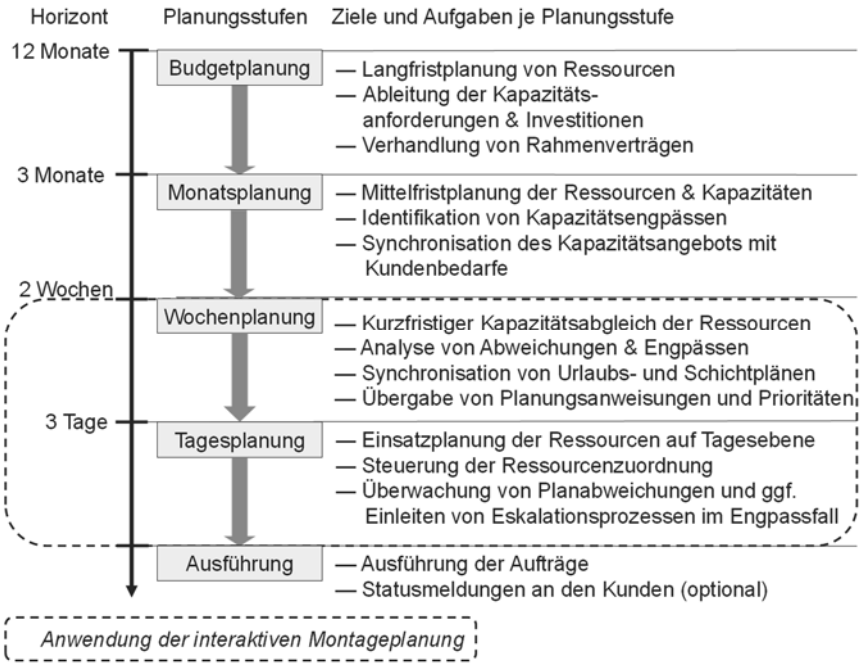


Abbildung 1: *Hierarchische Planung*

1.2 Einflussgrößen der Planung im Anlagenbau

Bei der Planung von modularen Anlagen mit hoher konstruktiver Varianz, teilweise sehr langen Montageprozessen, komplexen Arbeitsinhalten und oft schweren Bauteilen fällt die Austaktung der Montagelinien auf eine Reihe von Herausforderungen (Hentschel 2009). Die Planung der Montage im Anlagenbau ist geprägt

- durch stark schwankenden Aufwänden in den Montagestationen, z.B. in getakteten Linien oder Standmontagen sowie im Versand, da der Abgang der Maschinen nicht synchron zur Produktion verläuft;
- durch die Nachfrage nach spezifischen und zumeist limitierten Qualifikationen (Elektronik, Test, …) sowie
- durch Materialbedarfe zu unterschiedlichen Montagezeitpunkten, die für nachfolgende Montageschritte zwingende Voraussetzung für eine Montagefortführung sind.

Die Planung erfolgt anhand einer hierarchischen Planung, wie sie in Abbildung 1 dargestellt wurde: zunächst erfolgt die Planung auf aggregierter Ebene unter Berücksichtigung von Hauptkriterien (potentiellen Engpässen). Im Anschluss wird das Planungsergebnis an die Montageplanung übergeben, die eine tagesgenaue Sequenzierung der Auftragsabarbeitung vornimmt (Auer et al. 2011). In diesem Schritt wird die Austaktung der Linien bzw. Stände durch die Bildung einer Auftragsreihenfolge, zumeist unter Verwendung von Optimierungsalgorithmen vorgenommen (Altemaier 2009).

In der operativen Steuerung unterliegt die Montage üblicherweise kurzfristigen Änderungen. Dabei stellen sich folgende Fragen: welche Entscheidungen haben welchen Einfluss auf den Auftragsbestand und den Ressourcen bzw. welche Maßnahmen sind zu treffen, um das gewünschte Ziel einer hohen Auslastung bei gleichzeitiger Erfüllung der Terminvorgaben zu erreichen?

1.3 Ablauf der Planung im Anlagenbau

Zur Beantwortung der zuvor gestellten Fragen müssen die notwendigen Informationen über die Prozessfolgen und –aufwände der zu produzierenden Anlagen bzw. Maschinen in Form von Arbeitsplänen vorliegen. Im hochspezialisierten Maschinenbau gleicht allerdings keine Maschine der anderen. Um der Individualisierung im Anlagenbau zu begegnen, werden Standardarbeitspläne an die kundenspezifischen Belange angepasst. Damit liegen die Prozesszeit- und Qualifikationsanforderungen erst wenige Wochen vor dem eigentlichen Montageprozess vor. Die Aufwände der einzuplanenden Maschinen werden auf die Montage- und Versandstationen in Tagestöpfen verteilt, um anhand von Hauptkriterien Engpässe bereits zu einem frühen Zeitpunkt erkennen zu können.

Die Grobplanung wird wenige Wochen vor Montagestart fixiert, sofern die Materialverfügbarkeit gesichert ist. Auf Basis dieser Grundlage kann der Montageplaner nun seinerseits eine Sequenzierung innerhalb der Tagesscheiben vornehmen und den Einsatz seiner Mitarbeiter steuern.

Allerdings unterliegen die Montage- und Versandprozesse Störungen und Planabweichungen:

- Bestimmte Prozesse sind schwierig im Vorfeld der Planung zu terminieren, bspw. Testdurchläufe, sodass solcherart Prozesse kürzer als auch länger dauern können als angenommen und damit Engpassmitarbeiter binden.
- Fehlteile verhindern den Fortgang der Montage bzw. erzwingen eine Änderung an den Montagereihenfolgen und den damit verbundenen Einsatzzeitpunkten der Mitarbeiter.
- Durch die Anhäufung von Krankheitsfällen von Montage- bzw. Versandmitarbeitern steht die geplante Personalkapazität nicht zur Verfügung.

Diese und weitere Gründe bedürfen einer Reorganisation der Montagereihenfolgen. Die Änderung der Planung ist hinsichtlich seiner Auswirkungen auf das bestehende Montageprogramm zu bewerten. Aktuelle Planungs- und Stammdatenverwaltungsprogramme wie z.B. SAP stellen eine solche Funktionalität nicht zur Verfügung, da sie die komplexen Wirkungszusammenhänge von Prozessen, Ressourcen und Produkte nicht abbilden können. Dafür eignen sich Simulationsmodelle. Im folgenden Kapitel ist die Zielsetzung und Systematik eines simulationsbasierten Montageplanungssystems erläutert, welches die Möglichkeit aufweisen soll, Änderungen im interaktiven Modus analysieren und bewerten zu können.

2 Interaktives Montageplanungssystem

2.1 Zielsetzung

Das Ziel zur Einführung eines simulationsbasierten Montageplanungssystems ist es, die vorhandene Planungshierarchie auf der Ebene der Kurzfristplanung und der operativen Steuerung um den Baustein eines interaktiven Entscheidungsunterstützungssystems zu erweitern. Im Einzelnen sollen damit folgende Ziele erreicht werden.

- Verbesserte Planung der Montage bis zur Auslieferung durch die Nutzung eines interaktiven Montageplanungssystems zur Vermeidung von Unterauslastungen und Engpässen;
- Optimierung des Ressourceneinsatzes mit Konflikterkennung unter Berücksichtigung von Personalkapazitäten, Qualifikationen und dynamischen Abhängigkeiten in Montage und Versand;
- Absicherung der Vertriebsplanung durch Überprüfung der Machbarkeit von Anfragen hinsichtlich Liefertermine;
- Erweiterung der Planungsfunktionalität durch den Vergleich von Szenarien mit veränderten Stellgrößen (Sequenz, Kapazitäten, Bedarfe);
- Erhöhen der Reaktionsfähigkeit bei Änderungen durch schnell verfügbare Ergebnisdaten und –reports und
- Einbindung in operative Planungsprozesse durch definierte Datenübernahmen z.B. anhand von SAP-Schnittstellen.

Entscheidende Voraussetzung für einen solchen Einsatz ist die Funktionalität, eine unmittelbare Darstellung der Auswirkungen einer Änderung auf die Auslastungs- und Terminsituation aufzeigen zu können. Bei einer Veränderung eines Prozess-, Bedarfs- bzw. Kapazitätsparameter ist ein Simulationslauf zu starten, der in einer für den Anwender noch als unmittelbar wahrgenommenen Zeitspanne (< 3 Sekunden) Ergebnisse liefert. Die Interaktivität eines Systems ist gegeben, wenn dem Benutzer diverse Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten ermöglicht werden, die den Dialog zwischen ihm und dem Computer kennzeichnen (Bieber und Leggewie 2004).

2.2 Systematik der Planung

Zur Einbindung eines solchen Montageplanungssystems in die operativen Planungsprozesse sind die vorhandenen Stamm- und Bewegungsdaten aus den vorhandenen ERP-Systemen automatisiert zu übernehmen. Die Wirkzusammenhänge von Montage und Versand sind in einem Simulationsmodell zu hinterlegen. Anhand der Ergebnisanalyse lassen sich notwendige Maßnahmen ableiten und durch Änderungen an den Stellgrößen erneut durch eine Simulationsberechnung bewerten. Mit der Funktionalität einer interaktiven Rückmeldung wird eine iterative Annäherung an einen Zielzustand durch Szenarienanalysen durch den Planer ermöglicht. Die Bereitstellung einer solchen Planungsplattform verknüpft das Anwendungswissen des Planers mit einer virtuellen Welt, in der Was-wäre-wenn-Szenarien spielerisch durchprobiert werden können und als Grundlage für eine Umsetzung in das reale System dienen. Durch ergonomisch einfach zu bedienenden Eingriffs- und Änderungsmöglichkeiten in der Planung lassen sich alle denkbaren Konfigurationen analysieren und bewerten und

ermöglichen durch die Interaktivität eine quasi online-Anpassung der Kapazitäten an aktuelle Bedarfe (Abb. 2).

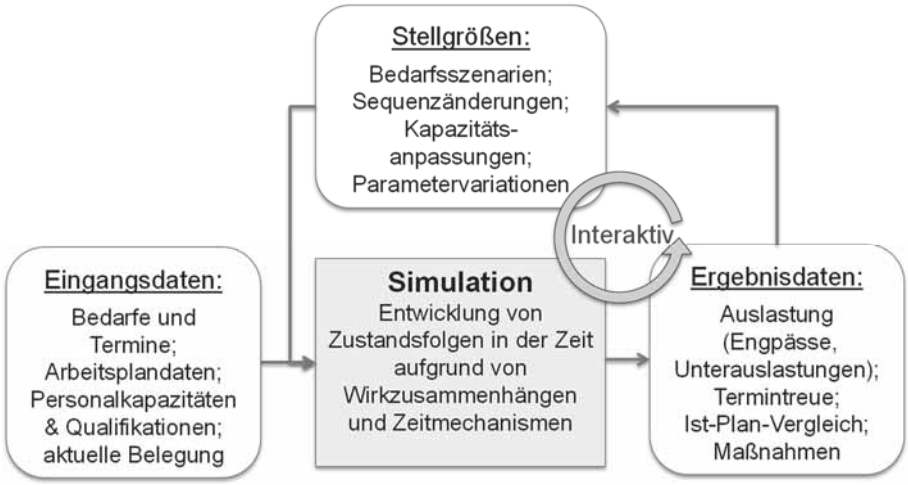


Abbildung 2: *Methodik der interaktiven Simulation*

2.3 Anwendungsarchitektur

Die Systemarchitektur des Planungssystems ist so zu gestalten, dass unterschiedliche Fragestellungen unabhängig voneinander und jederzeit möglich sind. Dies setzt einerseits eine verteilte Anwendung sowie eine extrem leistungsfähige Simulation im Sinne von Laufzeitverhalten voraus. In Abbildung 3 ist die grundlegende Architektur eines simulationsgestützten Planungssystems aufgezeigt, das von unterschiedlichen Anwendergruppen zeitgleich verwendet werden kann.

Für die Wahrnehmung einer interaktiven Rückmeldung an den Benutzer sind Antwortzeiten des Systems von wenigen Sekunden bindend. Um die Simulationsläufe über mehrere tausend Prozessschritte mit mannigfaltigen Entscheidungspunkten, ggfs. erweitert um Replikationen im Rahmen stochastischer Simulationen, in ein solch enges zeitliches Korsett zu zwängen, sind mehrere Maßnahmen zu ergreifen:

- Reduktion der in der Simulationsberechnung verwendeten Daten auf die notwendigen Indizes und Verknüpfung der Ergebnissimulationsdaten mit den für den Anwender relevanten Informationen;
- Begrenzung des Simulationsumfangs auf die durch die Veränderung relevanten Bereiche durch ein vorgeschaltete Analyse der Wirkungstiefe der Änderung;
- Vermeidung jedweder Schnittstellen und Transformationen zwischen den Funktionen von Simulation, Datenimport und -export, Client-Server-Anbindung, Datenverwaltung und –darstellung;
- Anwendung der verteilten Simulation von z.B. unabhängigen Teilbereichen oder Replikationen durch Nutzung von Mehrprozessorrechnern.

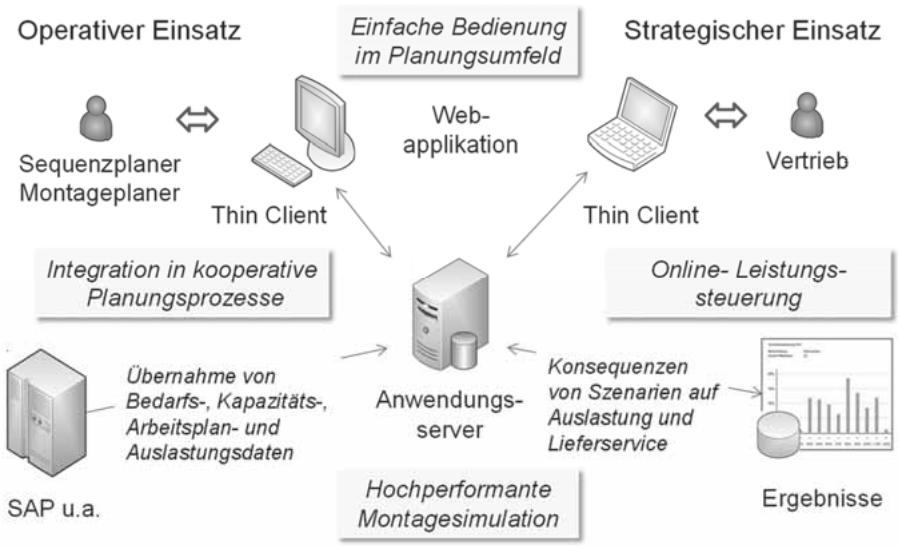


Abbildung 3: *Anwendungsarchitektur der online-Leistungssteuerung*

Eine solche IT-Architektur wurde in Anwendungsprojekten in enger Kooperation mit industriellen Partnern konzipiert und entwickelt. Die Softwarebibliothek umfasst eine Reihe von funktionalen Bausteinen und zeichnet sich neben den aufgezeigten Leistungsmerkmalen durch hohe Modularität und Erweiterbarkeit aus.

In der Folge kann durch die Einbindung von Optimierungsalgorithmen eine zeitnahe Entscheidungsgrundlage für Verbesserungen automatisiert zur Verfügung gestellt werden. Die Lösungskompetenz kann zudem auf angrenzende Planungsfelder z.B. der Logistik, erweitert werden.

2.4 Anwendung

Mit dem Planungsassistenten erhöht sich die Transparenz in der Analyse und Bewertung der Planungs- und Auslastungsdaten. Durch die interaktive Bedienung kann der Planer selbständig unterschiedliche Szenarien analysieren und bewerten und gewinnt kontinuierlich an Lösungswissen. Eine hohe Datenqualität ist anwendungsimmanent sichergestellt, da die Anwender eine hohe Motivation mitbringen, die Daten auf dem aktuellsten Stand zu halten, da sie diese für korrekte Prognosen benötigen. Sowohl die Dateneingabe als auch die Ergebnisse dienen ein und derselben Person, die somit ein Eigeninteresse an aktuellen und korrekten Daten hat.

Durch eine anschauliche Visualisierung der Ressourcenauslastung und Termineinhaltung der Aufträge ist eine gezielte Analyse und Bewertung sichergestellt. Im Falle notwendiger Planänderungen ist die Bewertung der Auswirkungen zeitnah aufzuzeigen. Dies soll am Beispiel einer geänderten Zuordnung von Prozessen zu einer Arbeitsgruppe illustriert werden. In Abbildung 4 sind auf der rechten und auf der linken Seite die Auslastungen und die zugeordneten Prozesse zweier Arbeitsgruppen dargestellt. Nun zeigt sich, dass es in der rechten Arbeitsgruppe mehrfach zu Überlastsituationen kommt. Durch die Zuordnung

ausgewählter Prozesse kann der Planer nun diese Prozesse der anderen Arbeitsgruppe zuordnen. Dabei werden alle Wirkzusammenhänge in Bezug auf Ressourcen- und Materialverfügbarkeit, Prozesszeitfolgen und Terminvorgaben berücksichtigt. Der Planer erhält unmittelbar eine Bewertung seines Planungsschrittes.

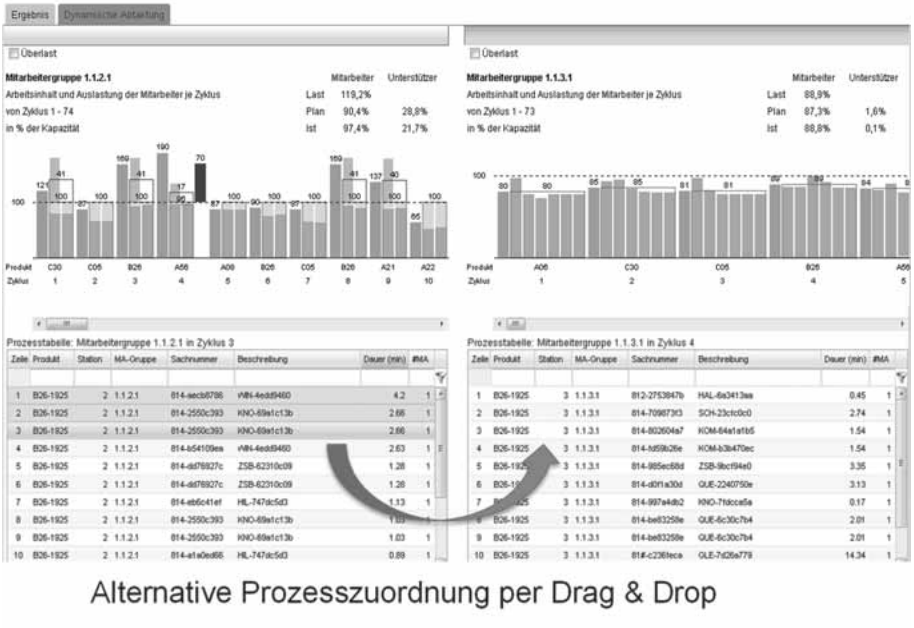


Abbildung 4: *Interaktive Konfiguration und Simulation von Szenarien*

Durch die Interaktivität der Anwendung sind mannigfaltige Szenarien durchspielbar. Gerade die Kombination aus dem Erfahrungswissen des Planers und der Abbildung komplexer Sachverhalte in der Montageplanung erlaubt eine zielgerichtete Reaktion auf kurzfristigen Änderungen und liefert die Transparenz über die Folgen einer solchen Planabweichung. Die Anwendung kann selbstverständlich auch bereits in der vorgelagerten Planungsstufe zur effizienteren bzw. robusteren Konfiguration der Montage genutzt werden.

3 Fazit und Ausblick

Die effiziente Auslastung der Montagemitarbeiter und -ressourcen im Anlagenbau ist aufgrund des hohen Personaleinsatzes und der damit verbundenen hohen Personalkosten eine stetige Aufgabe der Planung und Steuerung. Durch die hohe Produktvarianz werden unterschiedliche Maßnahmen zur Beherrschung der Varianz beschritten. Neben einer sinnvollen Reihenfolgebildung der eingesteuerten Aufträge kann dies mittel- bis langfristig durch eine Anpassung der Austaktung und kurzfristig durch die zeitnahe Bereitstellung von entscheidungsrelevanten Informationen erzielt werden, die einen jeweils auf die Gesamtsituation sinnvollen

Einsatz der Mitarbeiter ermöglicht. Dazu wurde im Beitrag aufgezeigt, wie mit Hilfe eines interaktiven, simulationsbasierten Planungswerkzeuges im Kurzfristbereich der Planung und Steuerung auch komplexe Wechselwirkungen zwischen der Zuordnung der Arbeitsinhalte, der Reihenfolge der Aufträge und der Zuordnung von Montagemitarbeiter berücksichtigt werden können.

Damit erschließt sich der Montageplanung eine online-Leistungssteuerung durch eine zeitnahe Anpassung der Planungsstellgrößen. Bislang konnte nur mit hohem manuellem Aufwand oder durch das Know-how von erfahrenen Montagesteuerer belastbare Aussagen über die Folgen alternativer Ablaufkonfigurationen getroffen werden. Mit dem vorgestellten Konzept eines interaktiven Montageplanungssystems ist eine kontinuierliche Überprüfung und Adaption der Montageplanung möglich.

Literatur

Altemeier, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie. Dissertation, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut: 2009

Auer, S.; März, L.; Tutsch H.; Sihn, S.: Classification of Interdependent Planning Restrictions and their Various Impacts on Long-, Mid- and Short Term Planning of High Variety Production. In: Duffie, N.: New Worlds of Manufacturing. 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2011. Madison, Wisconsin: Omnipress 2011

Bieber, C.; Leggewie, C.: Interaktivität: Ein transdisziplinärer Schlüsselbegriff. In: Interaktiva, Schriftenreihe des Zentrums für Medien und Interaktivität. Gießen: 2004

Hentschel, R.: Montageplanung im Maschinen- und Anlagenbau. Chancen und Grenzen der "Lean-Prinzipien" in der Planung von komplexen Montagen. In: Westkämper, E.; Verl, A. (Hrsg.): Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung -IPA-, Stuttgart: Schlanke Produktionsabläufe und zukunftsfähige Werkstrukturen: Konsolidieren - Sichern - Erweitern, 24. November 2009, S. 89-105

Minichmayr, J.; Auer, S.; Sihn, W.: Restriktionsbasierter Informationsaustausch zur harmonisierten Auftragsplanung in der variantenreichen Fahrzeugproduktion. In: Spath, D. (Hrsg.) ; Hochschulgruppe Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. -HAB-, München: Wissensarbeit - zwischen strengen Prozessen und kreativem Spielraum : 24. HAB-Forschungsseminar der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation; 07. - 08. Oktober 2011 in Stuttgart. Berlin: GITO-Verlag, 2011 (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V.), S. 477-490

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulationsgestützte Feinplanung im Produktionsumfeld – vom SAP zur SPS

Simulation-Based Dispatching in a Production System – from SAP to PLC

Norbert Höppe, Reis GmbH & Co. KG Maschinenfabrik, Obernburg (Germany),
n.hoeppe@reisrobotics.de

Florian Seeanner, SimPlan Systems GmbH, Maintal (Germany),
florian.seeanner@SimPlan.de

Sven Spieckermann, SimPlan AG, Maintal (Germany),
sven.spieckermann@SimPlan.de

Abstract: This paper is focused on a case study on system design, system operation, and simulation of a complex flexible welding cell. After an explanation of the material handling operations in the cell, it is demonstrated how the results of a discrete-event simulation study during system design, supported the decision on the implementation of a simulation-based manufacturing execution system (MES). The usage of the MES by the dispatchers of the real-world manufacturing system, the role of simulation during daily system operation, and technical details such as the interfaces with the SAP ERP and the PLC are described.

1 Einleitung

Der Einsatz von Simulation begleitend zum Betrieb eines Produktions- und Logistiksystems ist eine schon vor vielen Jahren beschriebene Möglichkeit, Simulation zu nutzen (vgl. etwa Noche und Scholtissek 1993 sowie Wenzel und Meyer 1993). Auch die VDI-Richtlinie 3633 (VDI 2007) beschreibt neben Anwendungsfällen in der Planungs- und Realisierungsphase einige Beispiele für den Simulationseinsatz in der Betriebsphase. Tatsächlich dominiert in der Praxis der Simulationseinsatz im Rahmen der Planungsphase von Produktions- und Logistiksystemen deutlich. Danach folgt die Verwendung von Simulation zur Unterstützung der Inbetriebnahmephase und erst dann Anwendungen im operativen Betrieb. Diese Erfahrungen belegen auch die in den Literaturübersichten z. B. von Jahangirian et al. (2010) und von Smith (2003) zusammengefassten Arbeiten.

Im vorliegenden Artikel wird eine Simulationsanwendung beschrieben, die im Rahmen der operativen Steuerung einer Laserschweißanlage zum Einsatz kommt, wobei das folgende Kapitel zunächst einen Überblick über den Aufbau der Anlage

und die Fertigungsabläufe gibt und dann das operative Auftragseinplanungsproblem skizziert. Kapitel 3 enthält eine kurze Einordnung in vergleichbare Aufgabenstellungen. Das vierte Kapitel geht auf die Simulation in der Phase der Anlagenplanung ein, aus der sich die Idee und Notwendigkeit einer simulationsbasierten Feinplanungslösung ergeben hat. Diese Lösung wird dann im fünften Kapitel inhaltlich und technisch erläutert. Das sechste und letzte Kapitel fasst die bisherigen Erfahrungen mit den Planungsläufen zusammen.

2 Problemstellung

Die betrachtete Anlage besitzt vier parallele Bearbeitungsplätze, zwei Schweißkabinen, ein automatisches Transportsystem, einen Warenträgerspeicher für bis zu elf leere Warenträger sowie einen Platz zur Ein- und Ausschleusung von Warenträgern. Die Warenträger (WT) werden zwischen den Arbeitsplätzen und den Schweißkabinen durch einen als „Shuttle“ bezeichneten Querverteilwagen transportiert. Der Shuttle hat zwei Aufnahmeplätze für WT. Auf den WT sind Vorrichtungen installiert, und in diese Vorrichtungen werden Blechteile eingelegt und zu Gehäusen zusammengeschweißt. Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Layout der Anlage.

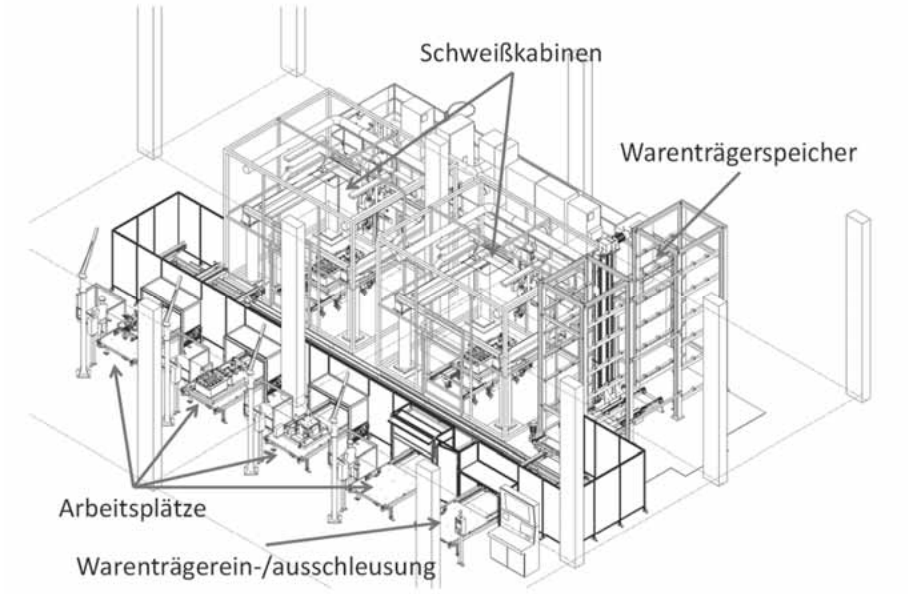


Abbildung 1: *3D-Layout der Laserschweißanlage*

Auf den meisten WT befindet sich exakt eine Vorrichtung. Es gibt jedoch auch WT auf denen mehrere Vorrichtungen gleichzeitig montiert sind. Auf letzteren können mehrere, sogenannte Kleinteile simultan gefertigt werden. Die Zuordnung von Vorrichtungen zu WT ist prinzipiell fix, dennoch können die Vorrichtungen grundsätzlich umgerüstet werden. Eine solche Umrüstung erfolgt außerhalb der Anlage und die WT müssen dazu aus- und wieder eingeschleust werden. Zudem

existieren identische Vorrichtungen, die parallel eingesetzt werden und dasselbe Teilespektrum fertigen können.

Ein Fertigungsauftrag, der in der Regel ein Los von gleichartigen Produkten umfasst (Losgröße > 1), wird immer vollständig an einem der vier Arbeitsplätze bearbeitet, da hierzu die vorbereiten Blechteile, z. B. per Stapler, an den entsprechenden Platz gebracht werden müssen. Ein Arbeiter setzt die Blechteile in die Vorrichtung (bei Kleinteilen ggf. in die Vorrichtungen) auf dem WT ein. Sobald dies geschehen ist, signalisiert der Arbeiter der Anlage durch Tastendruck auf einem Bedienpult am Arbeitsplatz, dass geschweißt werden kann. Der Shuttle holt daraufhin den WT ab und fährt ihn in eine freie Schweißkabine. Die beiden Schweißkabinen sind gleich ausgestattet und können alle Warenträger aufnehmen. Da allerdings immer nur in einer Kabine zur gleichen Zeit geschweißt wird (da es nur einen Laser gibt, der über Spiegeltechnik umgeleitet wird), erfüllt die zweite Kabine primär eine Pufferfunktion zur schnelleren WT-Bereitstellung. Die Steuerungslogik, wann ein WT abgeholt und in welcher Kabine er gebraucht wird, ist Teil der Anlagen-SPS. Nachdem ein Auftrag geschweißt wurde, holt der Shuttle den WT wieder ab und bringt ihn zum Ausgangsarbeitsplatz zurück. Abhängig vom zu fertigenden Auftrag ist es nun möglich, dass weitere Blechteile eingelegt werden oder dass das gesamte Gehäuse durch den Arbeiter in der Vorrichtung gedreht wird und der WT anschließend erneut in einer Schweißkabine bearbeitet wird.

Die Entscheidung darüber, welche Aufträge in die Schweißanlage eingesteuert werden sollen, liegt bei der Arbeitsvorbereitung. Die Bereitstellung der Fertigungsaufträge erfolgt im SAP ERP. Im PP-Modul des SAP-Systems werden mit Hilfe der Durchlaufterminierung Eckstart- und Eckendtermine berechnet, die als früheste Start- und späteste Endtermine bei der Einplanung berücksichtigt werden müssen (vgl. für einen einführenden Überblick zum SAP ERP Dickersbach und Keller 2010). Der jeweils verantwortliche Arbeitsvorbereiter legt anhand des Arbeitsinhalts der Fertigungsaufträge und des aktuellen Zustands der Anlage fest, welche offenen Aufträge als nächstes bearbeitet werden sollen. Dabei dürfen nur Aufträge eingeplant werden, wenn sich mindestens eine dazugehörige Vorrichtung auf einem WT im System befindet. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Anlage nicht auf die Umrüstung eines WT auf eine andere Vorrichtung warten muss.

Der Arbeitsvorbereiter versucht eine Anlagenbelegung für die gewählten Aufträge zu finden, bei der die Gesamtdauer (Zykluszeit) zur Fertigung der Aufträge möglichst minimal ist. Damit soll auch gleichzeitig das komplementäre Ziel der maximalen Laserauslastung erreicht werden, da der Schweißlaser die teuerste Komponente der Anlage darstellt. Eine wichtige Restriktion ist hierbei, dass für alle Aufträge die frühesten Start- und Endtermine eingehalten werden.

Die Anzahl der zulässigen Lösungen, die dem Arbeitsvorbereiter prinzipiell zur Verfügung stehen, ist sehr hoch. Es werden ca. 90 Sachnummern, 30 Vorrichtungen und 15 Warenträger betrachtet. Einige der Vorrichtungen sind identisch, so dass bestimmte Sachnummern auf verschiedenen WT gefertigt werden können. Ferner ist es möglich, dass die WT auf verschiedene Arbeitsplätze gefahren werden, wobei hier (wie oben erläutert) nicht alle Zuordnungen von Sachnummern zu Arbeitsplätzen erlaubt sind. Des Weiteren müssen Aufträge für Kleinteile zusammengefasst werden, da für jedes Kleinteil in SAP eigene Fertigungsaufträge

angelegt werden, diese jedoch gleichzeitig auf einem WT gefertigt werden können und sollen.

Zusätzlich können Sperrungen für einzelne WT, für einzelne Vorrichtungen, für eine der beiden Schweißkabinen und für ausgewählte Arbeitsplätze vorliegen (aufgrund von Störungen an der Ausrüstung, erforderlicher Wartung oder fehlender Teile). Die gesperrten Ressourcen dürfen dann bei der Belegungsplanung nicht berücksichtigt werden. Neben den Sperrungen sind natürlich die Schichtzeiten und das verfügbare Personal weitere limitierende Faktoren.

3 Stand der Technik

Sowohl für die Simulation von Anlagentechnik, wie im vorliegenden Beispiel, als auch für den Einsatz von Feinplanungsapplikationen zur Unterstützung der Ermittlung von Auftragsreihenfolgen finden sich zahlreiche Beispiele in der Literatur. Chan und Chan (2004) beschreiben mehr als 120 Studien, die sich mit der Steuerung von Aufträgen und Ressourcen in flexiblen Fertigungssystemen unter Verwendung von Simulation befassen. Dabei geben sie Definitionen von flexiblen Fertigungssystemen an, die so gefasst sind, dass sich das in Kapitel 2 beschriebene System in diese Kategorie einreiht. Gemäß diesen Definitionen sind flexible Fertigungssysteme Anlagen, in denen automatische Arbeitsstationen und manuelle Arbeitsplätze durch ein (teil-)automatisiertes Transportsystem miteinander verbunden sind.

Smith (2003) geht auf eine Reihe von Beispielen sowohl für den Einsatz von Simulation im Rahmen der Planung von flexiblen Fertigungssystemen („Flexible Manufacturing System Design“) als auch im Betrieb der Systeme („Manufacturing Systems Operation“) ein, wobei im letzteren Fall die Anzahl der Beispiele deutlich kleiner ist als im ersten Fall.

Werden die Feinplanungsapplikationen zur Steuerung flexibler Fertigungssysteme aus ablauforganisatorischer Sicht dem Scheduling und technisch den MES (Manufacturing Execution Systems) als einer Systemebene zwischen den unternehmensweiten Produktionsplanungs- und steuerungssystemen und der Anlagenebene zugeordnet, dann findet sich eine schier unerschöpfliche Fülle von Literatur wie der Blick in Lehrbücher (Pinedo 2012) oder jüngere Überblicksartikel (Quelhadj und Petrovic 2009, Framinan und Ruiz 2010, Saenz de Ugarte et al. 2010) zeigt. Die dort enthaltenen Beispiele weisen teilweise ganz ähnliche Merkmale auf wie die Feinplanungsapplikation, die in Kapitel 5 näher beschrieben wird.

Diese kurze Einordnung macht deutlich, dass die in diesem Artikel präsentierte Anwendung im wissenschaftlichen Sinne nicht neu ist. Allerdings ist die gemeinsame Anwendung von diskreter-ereignisorientierter Simulation innerhalb eines umfassenden Planungssystems oder innerhalb eines MES in der praktischen Anwendung immer noch eher die Ausnahme. Sauer (2010) sieht in der Unterstützung von MES durch Simulation einen zukünftigen Trend. Und Framinan und Ruiz (2010) weisen auf die andauernde Diskussion über die Lücke zwischen theoretischen Konzepten und der Umsetzung in konkrete Anwendungen hin. In dieser Hinsicht versteht sich der vorliegende Fall als ein Praxisbeispiel, in dem Simulationsanwendung in der Planung und im operativen Betrieb mit algorithmischen Ansätzen aus dem Scheduling und Applikationskonzepten aus dem Umfeld von MES zusammengeführt werden.

4 Simulation in der Anlagenplanung

Aufgrund der Ablaufkomplexität, die sich aus der unterschiedlichen Bestückung der Warenträger, den variantenabhängigen Bearbeitungszeiten, der Mehrmaschinenbedienung durch Werker und den stochastischen Ausfallzeiten der Schweißkabinen ergibt, wurde in der Planungsphase der Anlage die Ausbringung mit Hilfe von Simulation abgesichert. Zentrale Zielgröße war dabei die Auslastung der Schweißkabinen, die in Abhängigkeit von der Mitarbeiteranzahl und in Abhängigkeit von der Auftragsreihenfolge betrachtet wurde.

Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang von Mitarbeiteranzahl und Auslastung der Schweißkabinen, wobei auch mit der Art der Zuordnung der Mitarbeiter zu den Arbeitsplätzen experimentiert wurde. In der Variante „keine AP Zuordnung" kann jeder Mitarbeiter Tätigkeiten an jedem der Arbeitsplätze ausführen, an denen gerade ein WT steht. Demgegenüber darf bei der Variante „feste AP Zuordnung" jeder Mitarbeiter nur an einer definierten Teilmenge der Arbeitsplätze tätig werden.

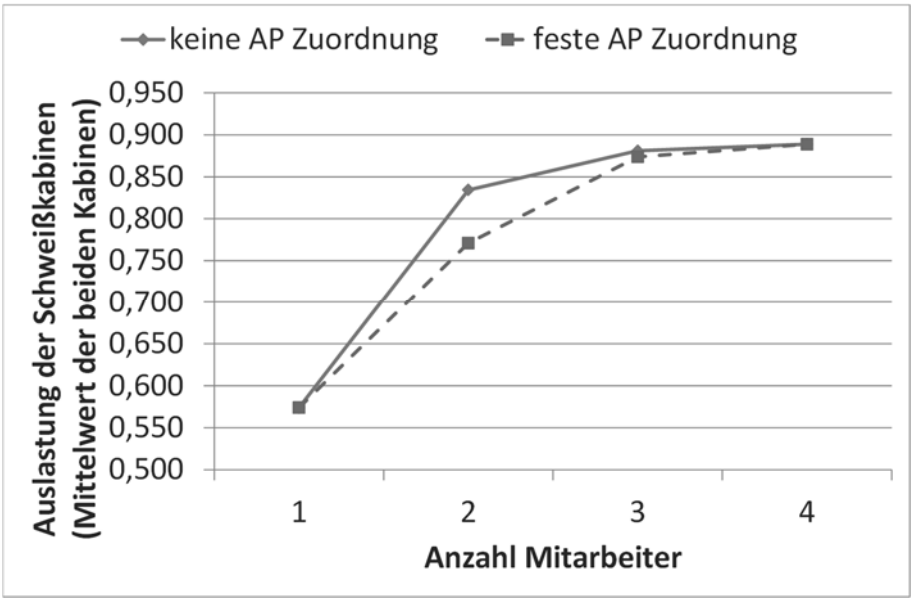


Abbildung 2: *Abhängigkeit der Auslastung der Schweißkabinen von der Mitarbeiteranzahl*

Die Analyse des Einflusses der Auftragsreihenfolge erfolgt mit Hilfe eines gegebenen Auftragspools. Für die Aufträge in diesem Pool wurden zufällig 500 unterschiedliche Reihenfolgen (Permutationen) gebildet und in das Simulationsmodell eingesteuert. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Simulationsläufe bei drei Mitarbeitern ohne feste Arbeitsplatzzuordnung in der Anlage. Für jede Permutation wurden fünf Replikationen durchgeführt; dargestellt ist jeweils der Mittelwert der Anlagenauslastungen gebildet über diese fünf Replikationen. Es ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite erheblich ist. Selbst ohne Berücksichtigung der hinsichtlich der Auslastung besten und schlechtesten

Reihenfolgen ergibt sich eine Schwankungsbreite in der Auslastung von rund zehn Prozentpunkten. Vergleichbare Untersuchungen mit einem, zwei oder vier Mitarbeitern haben zu ganz ähnlichen Ergebnissen geführt.

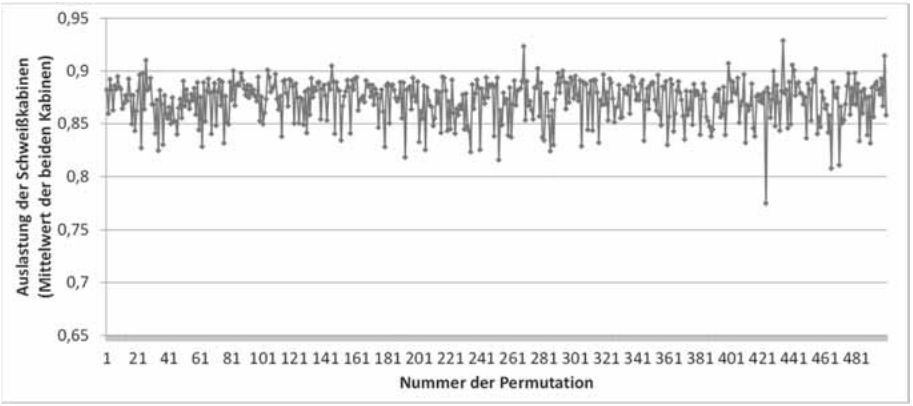


Abbildung 3: *Abhängigkeit der Auslastung der Schweißkabinen von der Auftragsreihenfolge*

Selbst wenn unterstellt wird, dass eine manuelle Arbeitsvorbereitung zu durchschnittlich besseren Ergebnissen kommen wird als der Zufall, machen diese Simulationsläufe die starke Abhängigkeit der Anlagenauslastung von der Auftragseinplanung deutlich. Das hat die Entscheidung bestärkt, in der realen Anlage ein Feinplanungswerkzeug zu implementieren, mit dessen Hilfe automatisiert Pläne zur Anlagenbelegung erzeugt und (simulativ) bewertet werden können.

5 Simulation als Bestandteil eines operativen Steuerungssystems

Das erstellte Feinplanungswerkzeug ist eine rollenbasierte Java-Webapplikation, die grundsätzlich von allen browserfähigen PCs im Intranet des Schweißanlagenbetreibers bedient werden kann. Die Applikation besteht aus einer Reihe von Komponenten, die in Abbildung 4 im Überblick dargestellt sind. Neben einer Schnittstelle zum SAP ERP und zum OPC Server der Schweißanlage enthält die Webapplikation eine Optimierungs- und Simulationskomponente, wobei die Simulationskomponente im Kern aus dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Simulationsmodell besteht. Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden bei der Beschreibung des Planungsablaufs erläutert.

Der grundsätzliche Ablauf zur Erstellung von Anlagenbelegungen ist in vier Hauptschritte unterteilt:

1. Der Arbeitsvorbereiter importiert Fertigungsaufträge mitsamt der in SAP verfügbaren Statusinformation in das Feinplanungswerkzeug. Die Kommunikation mit SAP erfolgt über Remote Function Calls (RFC), der Standardschnittstelle des ERP-Systems. Im Einzelnen wird zum Auslesen der Aufträge ein RFC-Funktionsbaustein verwendet. Dieser Baustein gibt eine Liste aller freigegebenen

Aufträge zurück, für die noch keinerlei Quittierungen im SAP ERP vorliegen. Die Liste umfasst neben der Auftrags-, Vorgangs- und Sachnummer auch eine Losgröße, ein Prioritätskennzeichen sowie den Eckstart- und Eckendtermin. Für die Quittierung werden (am Ende der Bearbeitung) über einen weiteren RFC-Funktionsbaustein die aktuell bearbeitete Auftragsnummer und die bearbeitete Sachnummer, der Status (IO, NIO) sowie ein Zeitstempel an das ERP-System übertragen. Aus den offenen Aufträgen wird vom Arbeitsvorbereiter eine Teilmenge einzuplanender Aufträge bestimmt. Diese Auswahlmöglichkeit war explizit gewünscht, um den Arbeitsvorbereiter die volle Freiheit zu lassen, welche Aufträge bearbeitet werden sollen. Wählt er nur einen einzelnen Auftrag aus, kann er somit explizit bestimmen, wo dieser gefertigt werden soll. Wählt er alle offenen Aufträge aus, liegt die Entscheidung fast vollständig bei der Optimierungs- und Simulationskomponente.

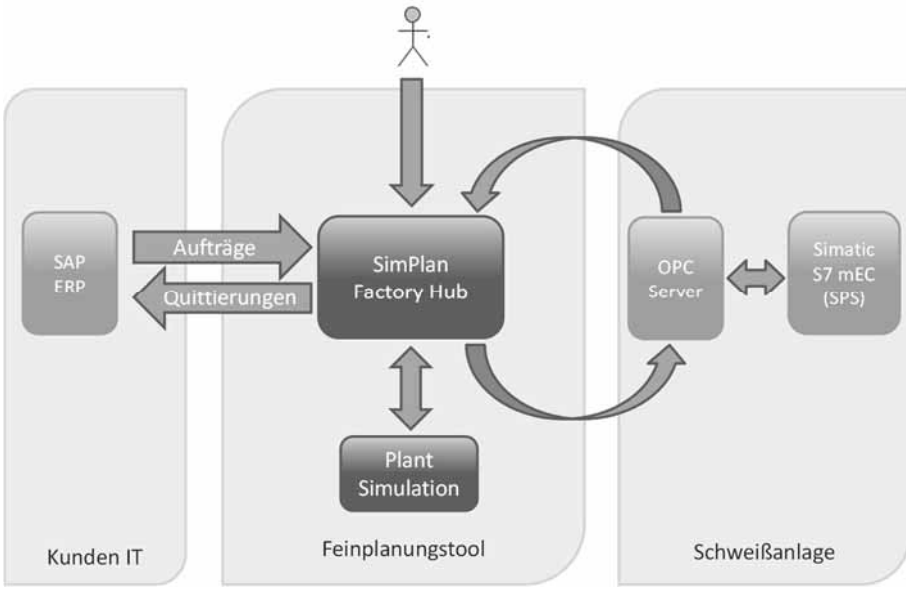


Abbildung 4: *Systemarchitektur des Feinplanungswerkzeugs*

2. Im nächsten Schritt stellt der Arbeitsvorbereiter die Anzahl verfügbarer Mitarbeiter und die aktuellen Schichtpläne ein, sperrt – falls erforderlich – einzelne Ressourcen wie Warenträger oder Maschinen und kann auf diese Weise eine Reihe sogenannter Planungsszenarien definieren. Das führende Anlagensystem (SPS) bestimmt, welche Einheiten (Arbeitsstationen, Schweißkabinen, WT und Vorrichtungen) grundsätzlich verfügbar sind. Bei der Erstellung eines Planungsszenarios können nur verfügbare Einheiten zusätzlich abgewählt werden. Es können jedoch keine Einheiten wieder aktiviert werden, die gemäß Daten der SPS in der Anlage nicht verfügbar sind.
3. Im dritten Schritt werden für die Planungsszenarien Produktionspläne erzeugt und bewertet. In der Regel werden vier bis acht verschiedene Pläne erstellt. In den ersten vier Plänen sind typischerweise Früh- und Spätschicht aktiv, und der

Arbeitsvorbereiter variiert die Anzahl der Mitarbeiter. Lassen sich die zu bearbeitenden Aufträge mit vier Mitarbeitern in zwei Schichten nicht bearbeiten, können Pläne unter Aktivierung der Nachtschicht (wiederum mit variabler Mitarbeiterzahl) erzeugt werden. Grundsätzlich kann der Arbeitsvorbereiter natürlich auch noch zusätzliche Parameter variabilisieren und sich auf diese Weise weitere Pläne berechnen lassen. Aufgrund der algorithmischen Komplexität kommen zur Ermittlung der Produktionspläne prioritätsregelbasierte Heuristiken zum Einsatz. Die erzeugten Pläne werden an das Simulationsmodell der Anlage übergeben. Da die Steuerungslogik der SPS nahezu vollständig im Simulationsmodell abgebildet ist, können Details zur Auslastung der Maschinen, zu den Wegen und Auslastungen der Werker, zu Auftragsdurchlaufzeiten und zu weiteren Kennzahlen kalkuliert werden. Diese Auftragsdurchlaufzeiten dienen nachgelagert auch als Sollzeiten für den Soll-/Ist-Vergleich.

4. Nach heuristischer Berechnung und simulativer Bewertung werden die Ergebnisse dem Arbeitsvorbereiter tabellarisch und in Form von konfigurierbaren Grafiken visualisiert. Auf dieser Basis kann dann der gewünschte Produktionsplan ausgewählt und schließlich über eine Schnittstelle an die Anlagensteuerung überspielt werden. Die Kommunikation mit der SPS erfolgt über das sogenannte Distributed Component Object Model (DCOM) mit dem Siemens OPC-Server, der auf der Siemens SPS (Simatic S7) läuft (vgl. Mahnke et al. 2009). Hierbei werden die Daten immer paarweise in der Form <Adresse, Nutzdatum> gesendet und empfangen, wobei die Adresse eine eindeutige Zeichenkette darstellt und das Nutzdatum einem Basisdatentyp (Ganzzahl, Kommazahl etc.) entsprechen muss. Für die Steuerung des Shuttles müssen Fahraufträge generiert werden. Neben der entsprechenden WT-Nummer beinhalten diese Fahraufträge die Bewegung von Schweißkabine zum Arbeitsplatz und umgekehrt sowie die Ein- und Auslager-Prozesse leerer WT im Speicherturm. Zu jeder Vorrichtungsnummer muss zudem eingetragen sein, welche Sachnummer sich darauf befindet, sodass der Schweißroboter weiß, was zu fertigen ist. Die Übertragung von Auftragsdaten an die SPS stellt sich dann beispielsweise dar, wie in Tabelle 1 gezeigt. Jede Zeile der Tabelle repräsentiert dabei ein Tupel der oben angegebenen Form <Adresse, Nutzdatum>. Sobald der erste Fahrauftrag zur Anlage überspielt wurde, kann mit der Produktion begonnen werden.

Tabelle 1: *Beispiel für die Datenübertragung zwischen MES und SPS*

Adresse	Nutzdatum
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Auftragsnummer	SAP_001
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Warentraeger	WT_05
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Vorrichtung01.Name_Vorrichtung	VT_07
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Vorrichtung01.Sachnummer	MAT_013
PCStation.WinLC RTX F EC. Auftrag[1].Vorrichtung01.Stueckzahl_soll	1

Die Feinplanungssoftware überwacht kontinuierlich den Produktionsfortschritt. Für jedes Teil, das geschweißt wurde, erfolgt eine Gutmeldung an das SAP ERP. Es ist jedoch möglich, dass Teile eines Fertigungsauftrages in der Anlage übersprungen werden, weil z. B. nicht genügend Bleche an den Arbeitsplätzen bereitgestellt sind.

In diesem Fall meldet das System das Teil als Nicht-in-Ordnung (NIO). Die Bearbeitung muss dann zu einem späteren Zeitpunkt komplettiert werden. Grundsätzlich wird der komplette Produktionsfortschritt in der Datenbank persistiert, sodass verschiedene Auswertungen (z. B. Soll-/Ist-Vergleiche oder tatsächliche Durchlaufzeiten) durchgeführt werden können.

6 Zusammenfassung der Erfahrungen mit der Feinplanungslösung

Zunächst einmal ist festzuhalten, dass die Gesamtanlage ohne eine Softwarekomponente, die Aufträge aus dem SAP ERP „abholt", anschließend eine Auswahl unter diesen Aufträgen unterstützt und schließlich freigegebene Aufträge in einzelne Fahraufträge umwandelt, die von der SPS verarbeitet werden können, nicht funktionieren würde.

Es hat sich gezeigt, dass der eigentliche Feinplanungsschritt, die mit Hilfe von Optimierung und Simulation erfolgende Auswahl und Bewertung von Aufträgen, auch bei einer solch vergleichsweise kleinen Anlage und bei der heute zur Verfügung stehenden Rechnertechnologie noch eine anspruchsvolle Aufgabe ist. Die iterative Erzeugung von Plänen mit anschließender simulativer Bewertung für die nächsten 48 Stunden Anlagenlaufzeit erfordert einige Minuten an Rechenzeit. Ein solcher Plan umfasst dann typischerweise bis zu 130 Fertigungsaufträge und führt zu rund 10.000 Fahraufträgen, die an die SPS überspielt werden müssen.

Die Einschätzung der Auftragsvorbereiter als Hauptanwender der Feinplanungsapplikation ist, dass ihnen die Software die tägliche Arbeit erheblich erleichtert, und dass gegenüber einer manuellen Auswahl von Aufträgen viel Arbeitszeit in der Arbeitsvorbereitung selbst eingespart wird. Die Auslastung der Schweißkabinen liegt (soweit das rund sechs Monate nach Anlauf der Anlage abgeschätzt werden kann) im oberen Bereich der in Kapitel 4 diskutierten Bandbreiten. Insgesamt hat sich das Konzept der simulationsgestützten Feinplanung auch im vorliegenden Fall bewährt, so dass es in vergleichbaren Schweißanlagen des Systemintegrators ebenfalls mit zum Einsatz kommen soll.

Literatur

Chan, F.T.S.; Chan, H.K.: A comprehensive survey and future trend of simulation study on FMS scheduling. Journal of Intelligent Manufacturing 15 (2004), S. 87-102.

Dickersbach, J.T.; Keller, G.: Produktionsplanung und –steuerung mit SAP ERP: Grundlagen – Prozesse – Customizingwissen. 3. Auflage, Bonn, Boston: Galileo Press 2010.

Framinan, J.M.; Ruiz, R.: Architecture of manufacturing scheduling systems: literature review and an integrated proposal. European Journal of Operational Research 205 (2010), S. 237-246.

Jahangirian, M.; Eldabi, T.; Naseer, A.; Stergioulas, L.K; Young T.: Simulation in manufacturing and business: a review. European Journal of Operational Research 203 (2010), S. 1-13.

Mahnke, W.; Leitner, S.-H.; Damm, M.: OPC Unified Architecture. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.

Noche, B.; Scholtissek, P.: Anwendungen der Simulation in der Unternehmensplanung. In: Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Handbuch der Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik, Braunschweig: Vieweg 1993, S. 267-307.

Ouelhadj, D.; Petrovic, S.: Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. Journal of Scheduling 12 (2009) 4, S. 417-431.

Pinedo, M.: Scheduling – Theory, Algorithms, and Systems. 4. Auflage, New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer 2012.

Saenz de Ugarte, B.; Artiba, A.; Pellerin, R.: Manufacturing execution systems – a literature review. Production Planning & Control 20 (2010) 6, S. 525-539.

Sauer, O.: Trends in manufacturing execution systems. In: Huang, G.Q.; Mak, K.L.; Maropoulos, P.G. (Hrsg.): Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 685-693.

Smith, J.S.: Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. Journal of Manufacturing Systems 22 (2003) 2, S. 157-161.

VDI (2007): Richtlinie 3633 Blatt 1 „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“. Berlin: Beuth.

Wenzel, S.; Meyer, R.: Kopplung der Simulation mit Methoden des Datenmanagements. In: Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Handbuch der Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik, Braunschweig: Vieweg 1993, S. 347-368.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Autonomous Control in Production Networks under Stochastic Influence

Selbststeuerung in Produktionsnetzen unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse

Pinar Boyaci, Robert Bosch GmbH, Stuttgart (Germany),
Pinar.Boyaci@de.bosch.com
Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany), S.Wenzel@uni-kassel.de

Abstract: The scope of this paper is the assessment of inventory reducing autonomous control strategies in serial production networks under stochastic influence. Thereby a flow shop scenario with three production lines including four processors in each case is considered. Three types of products are manufactured, whereas each type is preferably produced on one specific line. In order to maintain validity, a time-continuous approximation of a discrete event simulation model of the flow shop is realized. New methods of feedforward and feedback control as well as a combined strategy are used. After discussing the outcomes of control strategies under deterministic conditions, stochastic effects are added. Implications from deterministic and stochastic realizations are discussed under comparison of their behaviour.

1 Introduction

Companies today are faced with the challenges of decreasing product lifecycles, increasing product diversity, unstable production plans, market globalization and numerous other factors. In such an environment they have to be as flexible and adaptable as the market itself (Nyhuis et al. 2008). This causes turbulences and complexity in production planning and control. In order to induce flexibility and adaptability, production and logistics systems are regarded analogous to physical systems. Similar to implementing control in technical systems for overcoming instabilities and irregular states, new methods for the control of complex dynamics in production and logistics systems are needed (Windt 2006). Plenty of approaches to modelling and controlling the dynamics of production systems have already been developed in the last years (Wiendahl and Breithaupt 2000), whereas pioneering work in this field was published by Forrester (1958). Besides simple push and pull strategies, more sophisticated techniques are regarded as well (van den Berg et al. 2008). However in classical production planning and control systems all flows of

parts and processes within the production network are planned ahead by a central planning and control supervisory. In cases of machine failures or absence of material the whole production plan is reorganized, in order to meet the new requirements. The poor degree of flexibility and adaptability which central production planning and control systems show yields in suboptimal performance and low efficiency of the system (Scholz-Reiter et al. 2008, Scholz-Reiter et al. 2007). Per introducing autonomous control to production systems the classical aims of production logistics like minimizing inventory, maximizing throughput or minimizing throughput times (Günther and Tempelmeier 2005) can be achieved. Out of these reasons the benefits of autonomous production planning and control strategies are discussed in recent literature (Scholz-Reiter et al. 2008, Windt et al. 2010a). A majority of considered instruments were developed for the application in job-shop manufacturing since autonomous control in serial flow shop manufacturing is stated as unreasonable due to the solid interlinking of production elements (cf. Scholz-Reiter et al. 2006). Hence, this kind of production is typical for the automotive industry which counts a respectable sector nowadays. Windt et al. (2010b) demonstrate the realization of new autonomously controlled flow shops where the material is able to decide which product variant it becomes. Boyaci and Wenzel (2011) provide new autonomous control policies for the incorporation in an existing serial production system. The scope of this article is to observe the behaviour of these new autonomous control methodologies for a serial production environment under stochastic influences.

In section 2 the considered flow shop scenario is described and the derived autonomous control strategies are shown. Modelling procedures for the discrete event and time-continuous simulation models are provided by section 3. Section 4 demonstrates the simulation results of the presented investigations. Major findings of the presented work and outlines for future aspects are summarized in section 5.

2 Autonomous Control in Production Networks

The autonomous control strategies are performed according to the methods presented in Boyaci and Wenzel (2011). They are derived from an extension of the flow shop scenario described in Boyaci and Wenzel (2010) (cf. Fig. 1).

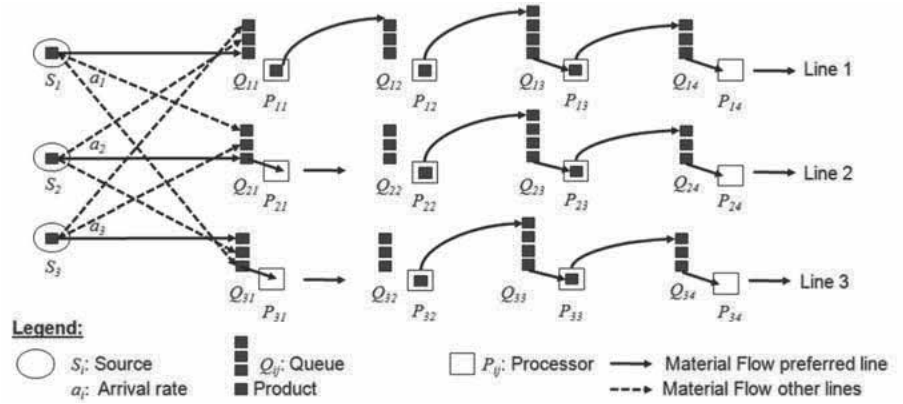


Figure 1: *Flow shop scenario*

The production system consists of three parallel production lines which are organized in the same manner. Parts disembark from the sources S_1, S_2 and S_3 respectively and proceed to one of the three production lines for further treatment. Since we are modelling a serial production, parts do not have the chance to interchange lines, contrary to the scenario assessed by Dashkovski et al. (2006) and Scholz-Reiter et al. (2007). Therefore, once a production line is chosen, parts cannot move to other lines. Furthermore there are no parts gained or lost during the production process. Raw material from the suppliers and buffer capacities of the queues are supposed to be infinite. During the simulation studies setup times are not considered. Within the production system machines do not have any failures or breakdowns. The content of the queues is processed by a FIFO (first-in-first-out) policy. Each production line consists of four processors P_{ij}. In front of every processor exists a queue Q_{ij}. The processors work with capacities c_{ij}. Whereas $i = 1, 2, 3$ mark the indexes of the production lines and $j = 1, 2, 3, 4$ denote the subscripts of processors, queues and capacities of a specific production step.

2.1 Central Routing Policy (CRP)

By application of the first control strategy, all parts out of S_i are directed to production line i with the arrival rate a_i for all $i=1, 2, 3$. These material flows are represented by the solid lines. The demonstrated routing process is equal to a centralized planning. All incoming material is determined prior to its arrival which production line to choose. In the following this method is called Central Routing Policy (CRP).

2.2 Feedforward Control Methodology (FFC)

Parts arriving from the sources S_i, now have the chance to choose a production line of their favour which is represented by the dashed lines in Figure 1. Contrary to Figure 1 let us assume production line 1 to be only capable of producing product types out of S_1. However, production lines 2 and 3 have the ability of producing all product types which occur within the production system. This is a realistic assumption since mutability in manufacturing is only possible to a certain degree. Choice of a suitable production line for each arriving part happens by using a new inventory reducing policy, called Feedforward Control (FFC) in the following. Comparing buffer levels in every production line, parts choose the line with the minimum level to enter. Buffers of the production lines at a certain time step t are represented by:

$$\begin{aligned} Q_1^* &= Q_{11}(t) + Q_{12}(t) + Q_{13}(t) + Q_{14}(t), \\ Q_2^* &= Q_{21}(t) + Q_{22}(t) + Q_{23}(t) + Q_{24}(t), \\ Q_3^* &= Q_{31}(t) + Q_{32}(t) + Q_{33}(t) + Q_{34}(t). \end{aligned} \tag{1}$$

Q_1^*, Q_2^* and Q_3^* denote the sums of buffers in production line 1, 2 and 3, respectively. Since all processors within the production lines are strongly coupled to each other, the outflow location of the parts is determined by their inflow location. On arrival of a part at a production line, two possible situations for each buffer are distinguished. Hence, either condition $Q_1^* = 0$ or $Q_1^* > 0$ is fulfilled. If all buffers in the production line are empty at the same time, then all parts proceed to their

preferred production line. For all other cases, the control parameters are determined by the situation of the buffer contents. Production line 1 which is only capable of producing parts out of S_1, is fed with parts till its capacity is exceeded. Material which arrives at production line 1 in situations where it is working on full capacity is directed to the other production lines.

2.3 Feedback Control Methodology (FBC)

In the next routing policy a proportional-integral controller (PI-controller) for realizing a feedback control is implemented. Thereby a characteristic system's variable is chosen in order to follow a reference signal. By measuring the output variable, a suitable input signal for the system is derived. We will call this methodology feedback control (FBC). Hereby an input variable into the control system which provides the input signal of the controller must be defined. In our system's realization it is given by the arrival rate of parts into the system a_i. Furthermore a control variable must be chosen, in dependence of the desired control object. Since we are aiming the reduction of inventory, our control variable is the total inventory of the production system which is given by:

$$Q^*_{total}(t) = Q^*_1(t) + Q^*_2(t) + Q^*_3(t). \tag{2}$$

In order to control this variable to a desired level, the error term

$$e(t) = Q^*_{total}(t) - 0, \tag{3}$$

is established, whereby the total inventory of the production system is controlled against a zero level. Generally, any variable within the system can be controlled to any value. After defining the necessary parameters, the controller can be implemented. Thereby the adjustment of the input variable is driven by the control parameters K_p for the proportional response and K_i for multiplying the integral term (Philips and Harbor 2000). They help deriving the corrected input signal for the system. Within the described setup, the obtained control parameters are $K_p = 12$ and $K_i = 0.06$. A table with algorithms of the controller can be found in Boyaci and Wenzel (2011).

2.4 Combined Control Strategy (CC)

The last presented control strategy combines FFC with FBC. FFC generates a splitting of the incoming parts onto the three production lines within the production system in order to reduce the inventory by maintaining a better utilization of the processors. Whereas FBC induces a proper arrival profile of the parts for capturing better the capacity of the machines. As both approaches support the reduction of the buffer queue contents within the production system a combination of them promises the best result in diminishing the inventory. After setting up a typical production scenario in serial production, we introduced different control methods. All of them are organized in order to lower the inventory within the manufacturing systems. In the next section we will show two different modelling methods for realizing the demonstrated strategies by conducting computer simulations of the models. By comparing the results in prospect to the arrival profile of the parts, the buffer queue contents and the outflow profile of the parts, all control methods are assessed.

3 Simulation Models

For conducting the simulation studies, the models described in Boyaci and Wenzel (2010) are extended to capture the production scenario presented in section 2. The simultaneous modelling procedure from Boyaci and Wenzel (2010, 2011) is carried on for the analysis of the stochastic influence in this paper. This procedure allows maintaining validity of the models throughout the whole analysis. Furthermore FBC within the discrete event model is realized by using the time-continuous arrival rates, generated by the PI-controller in section 2.3. However the stochastic influence is assessed within the discrete event model. Therefore the parallel enhancement of both models as well as their validity is essential for the analysis of the stochastic influence. First, a time-continuous model consisting of ordinary differential equations is derived. In the second modelling step a discrete event simulation model which is supposed to show the same characteristics as the time-continuous model is composed. In the following, both models will be shortly explained, a more detailed description of the ODE as well as the DES can be found in Boyaci and Wenzel (2010, 2011).

3.1 Ordinary Differential Equations Model (ODE)

Individual processors are modelled by ordinary differential equations. Parts arrive at the processors by an inflow rate P_{ij}^{in}. Within a time-continuous system fractions are processed rather than single parts. Thus, the inflows into the first processors in every line of the production system must be individually defined for every control strategy, described in section 2. Every processor disposes over a certain capacity c_{ij}. This capacity determines the outflow out of the processor P_{ij}^{out}. As soon as the inflow gets greater than the capacity, a queue Q_{ij} in front of the processor arises. The evolution of the buffer queue contents is approximated by a system of coupled ordinary differential equations, given by inflow P_{ij}^{in} into the processor minus outflow P_{ij}^{out} of the processor.

3.2 Discrete Event Model (DES)

The same scenario is implemented as a discrete event simulation model. Thereby the sources where the parts come from, are modelled as entity generators which generate entities upon certain event times e_i with $i=1, 2, 3$. These event times are the conversed arrival rates of the time-continuous model. Entities proceed to the different production lines according to the chosen control strategy. Hereby the routing of the entities is realized by different routing blocks.

4 Stochastic Influence on Simulation Results

In simulation studies of the time-continuous and discrete event model, the behaviour of the control strategies from section 2 is assessed. Thereby main differences in the inflow characteristics of parts into the production system between both models, as well as between the control methodologies are demonstrated. By observing the evolution of the buffer queue contents, attention can be drawn to the inventory reducing effects of the implemented control options. Hereby additional impacts on the outflow times of the parts can be analyzed. Stochastic influence into the system is added by a variation in the interarrival times of parts.

4.1 Inflow into the Production Line

On a closer look on Figure 2, the characteristics of both inflow functions can be compared for CRP and FFC. Hence the upper part of the diagram displays the time-continuous inflow of parts per time interval.

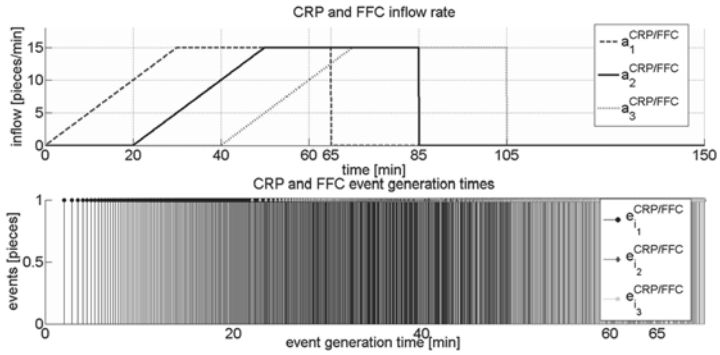


Figure 2: *Inflows time-continuous and discrete event model of control strategies*

Identical input functions a_1, a_2, and a_3 represent inflows into the production lines. They start with a ramping up period, followed by a constant flow, ending with a ramping down interval and are separated by certain time-lags. In order to keep reproducibility between the outcomes of both models, the discrete interarrival times e_{i1}, e_{i2} and e_{i3} of the parts are obtained by integration of the time-continuous input functions a_1, a_2, and a_3 and illustrated in the lower part of Figure 2. During the constant sections of the functions, the input is 15 pieces/min. Capacities of the processors within each production line are given by c_{i1} = 15 pieces/min, c_{i2} = 10 pieces/min, c_{13} = 10 pieces/min, c_{23} = 10 pieces/min, c_{33} = 8 pieces/min, c_{i4} = 15 pieces/min with $i = 1, 2, 3$. Inflow functions can be regarded as a realization of customer orders within the production system. Applying CRP and FFC, customer orders are directly fed into the individual production lines, corresponding to the chosen policy. With FBC the inflow levels are limited on the minimal processor capacity per production line. This effect prevents the building of queues in front of the servers. However, the time the final part enters the system with FBC, lays 35% behind the last arrival with CRP and FFC. Transferred into a real world example, customer orders would be placed later into the production system for maintaining a lower inventory level. Since CC is a combination of FFC and FBC it aggregates the benefits of FFC with those of FBC. Allocation of parts on production lines depends on the total buffer queue contents within the production system. Thus, the characteristics of the inflow are similar to FBC, but slightly differ due to the redirection of parts. Production line 1 gets only as much parts as it can handle without building up a queue. The rest is routed to the other lines. This effect results in a delay of 24% in the arrival time of the final part compared to CRP and FFC. Hence the last entrance into the production system is 8% earlier in time than with FBC. On this account, customer orders can be started earlier by using CC. By adding stochastic behaviour to the inflow functions, the resulting totality of interarrival times with CRP and FFC for production line 2, is given through the histogram in the left part of Figure 3.

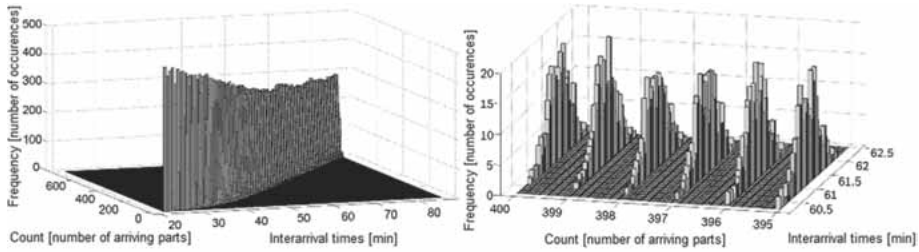


Figure 3: *Interarrival time distributions of Line 2 with CRP and FFC*

We assume an even outflow of the upstream process which varies in a given time frame. Therefore the interarrival times of the parts oscillate around a given mean. This phenomenon is realized by using a normaldistribution which is representing fluctuations around a certain value very well. Thus, the interarrival times are subject to random variation by a normal distribution with mean 0 and a variance of 5%. For variation of the parameters 500 realizations have been conducted. In each experiment a new set of start parameters was generated. On the x-axis the count of parts is mapped. With CRP, 750 parts arrive in total at production line 2. The y-axis displays the distributions of the event generation times depending on the count of the arrived part. The z-axis illustrates the absolute frequency of each event generation time. In a selection of a few interarrival times in the histogram on the right half of Figure 3, the characteristics of the normal distribution can be noticed in the absolute frequency of the event generation times.

4.2 Inventory within the Production System

The inventory per production line is displayed by the characteristic buffer levels Q_i* given in Equation 1. With CRP Q_1* reaches its maximum at 200 pieces whereas the FFC lowers it nearly to zero. This is partly due to the fact that by FFC parts from line 1 can be routed to the other lines but parts from lines 2 and 3 cannot be routed to line 1. FBC and CC manage to bring the buffers in line 1 to a nearly empty level as well. On account of the additional load from line 1 the buffers of FFC increase much more than with CRP in line 2 which is displayed on the left of Figure 4.

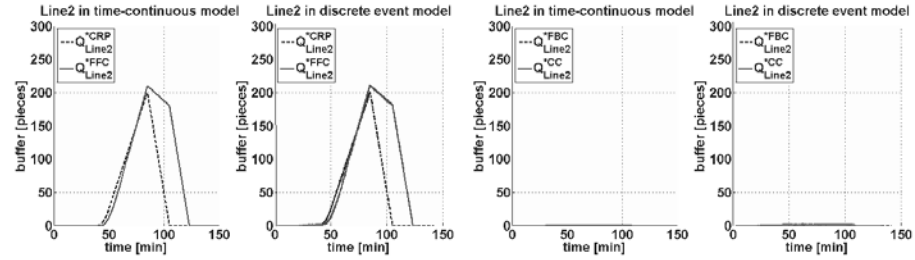


Figure 4: *Buffer in Production Line 2 in time-continuous and discrete event model*

Furthermore they are emptied later with FFC than with CRP which will cause a longer throughput time of the parts. Taking a closer look at the right hand side of Figure 4 we can see that the buffers of line 2 are nearly emptied by applying FBC

and CC. Here the success of the PI controller which was designed in order to reduce the buffers within the production system can be seen very clearly. The suitability of the control parameters K_p and K_i is therefore approved. Production line 2 is capable of producing all product types and has the highest capacity. Hence, the most interesting effects of the control strategies can be observed in line 2. Therefore we concentrate in further discussions on this production line. In the following, the behaviour of the buffer queue contents within the production system for the different control strategies under stochastic influence will be examined. Thereby especially the stochastic effects on FFC, FBC and CC, compared to the deterministic outcomes will be interesting. Initially, stochastic influences will be analyzed in the discrete event system. Especially the implementation of the deterministic time-continuous PI-controller from section 2.3 within the discrete event system under stochastic variation will be investigated. Depending on the outcomes, further studies of the time-continuous system under stochastic considerations may be necessary. In Figure 5 the buffers of line 2 under implementation of the different control strategies are visualized.

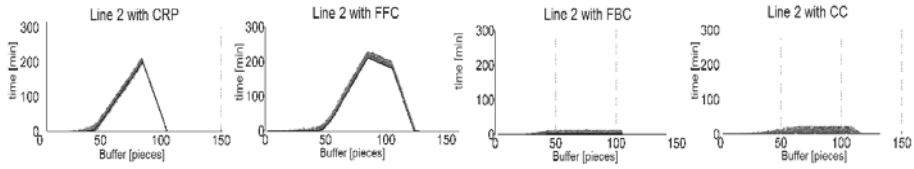


Figure 5: *Buffer under stochastic variation in Line 2*

Thereby the outcomes for all 500 realizations of the simulation experiments are plotted in the four displayed diagrams. The mean of the buffers with CRP in the upper left part of Figure 5 and FFC in the upper right part as well as FBC in the lower left and CC in the lower right show the same characteristics as the buffer queues in the deterministic studies. Therefore we have shown that all four control strategies can be used under stochastic variation as well. However, the investigations of the stochastic influence show that the application of a feedback controller which was derived in a deterministic environment is also suitable for stochastic variations. Thus, the developed feedback controller works under consideration of stochastic behaviour. Nevertheless the functionality of the controller was only analyzed for a stochastic variation of the interarrival times with a normal distribution. For examination of stochastic behaviour in systems with differing upstream processes other probability distributions have to be taken into account. In production processes for example the exponential distribution is common for arrival processes. Production line 3 has the maximum characteristic buffer level of 294 with CRP. Since FFC divides the flows between production line 2 and 3 according to their actual buffer state and their capacities, less flow is fed into production line 3 compared to production line 2 with FFC. Thus, the maximum level is lower than with CRP. FBC and CC provide a decrease of the buffers in production line 3 as well. FBC and CC do not prove a great difference concerning the buffer queues within the production system. The benefit of CC is more emphasized in the next section where the outflow profile of the production systems is analyzed.

4.3 Outflow of the produced parts

The outflows o_1, o_2, o_3 of the production lines, corresponding to the throughput rate of a production system, represent leaving times of parts and working rates of production lines. Since production line 3 has the lowest capacity, the last part leaves the system at 141 minutes. By passing parts to line 2 which has a higher capacity, the production of line 3 can save 10% time in producing the last part. Line 1 gets only as many parts as it can handle without building queues. Hence, it passes parts to line 2 whenever it seems to get overloaded and its last part can leave the system with FFC 25% earlier in time than with CRP. However, these reductions of lines 1 and 3 are paid by 20% longer time till the last part of line 2 leaves. Since line 2 can handle all types of parts and has a higher capacity than line 3 it seems reasonable to utilize it at full capacity. The departure of the last part of FBC is at the same time as CRP. Thus the parts leave the system simultaneously in FBC as in CRP, but they spend less time within the system. According to Hopp and Spearman (2001) this is not only beneficial in terms of reducing costs by maintaining a lower inventory within the production system. It is also an advantage in case of changes in the orders of the customer or by downtime of machines in the production system. Changes of the outside parameters of the production system can be responded better the later orders are realized. The last part of line 3 leaves the system with CC 8% earlier in time than with FBC.

5 Conclusion and Outlook

We have shown four different control strategies for a serial production environment with different product variants. Besides, a central routing policy, feedforward and feedback control as well as a combined strategy of both approaches were implemented. A time-continuous and a discrete event simulation model of a realistic production scenario were used for their evaluation. We investigated changes in the inflow rate, the inventory level and throughput times in the production system in dependency of the derived policies. By comparing metrics of all strategies, CC performs best within the modelled environment. Besides reduced inventory in the production system, the departure time of the last produced part could be lowered in contrast to CRP and FBC. However, the departure time of the last piece is lower in FFC than in CC since the parts can be better allocated between the different production lines. Along with deterministic studies, stochastic effects have been added to the analysis. In varying interarrival times of the parts for all production lines, distributions for all event generation times have been derived in 500 realizations. Thereby a normal distribution with mean 0 and a variation of 5% has been used. We illustrated the influence of stochastics on the behaviour of the buffer queue contents by applying different control strategies. All four methodologies resulted in varied buffer queues with the same mean as in the deterministic studies. Therefore the functionality of the control policies within a stochastic environment under assumption of an even upstream process by variation of interarrival times with a normal distribution was approved. In further research a higher load and higher numbers of different product variants can be taken into account. Moreover, the manufacturing system can be extended. Instead of controlling inventory levels the demand or throughput rate can be controlled. Furthermore the stochastic variation can be extended to general upstream processes by using different distributions.

References

van den Berg, R., Lefeber, E., Rooda, K. (2008) Modeling and Control of a Manufacturing Flow Line using Partial Differential Equations. IEEE Transactions on Control Systems Technology 16 (2008), pp. 130-136.

Boyaci, P., Wenzel, S. (2010) Autonomous Control in Serial Production with Time-Continuous and Discrete-Event Models. In: Zülch, G.H. (Ed.), Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal; KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, pp. 325–332.

Boyaci, P., Wenzel, S. (2011) Controlling production networks by using time-continuous and discrete-event simulation. In: Spath, D., Ilg, R., Krause, T.H. (Eds.), International Conference on Production Research ICPR 21 – Conference Proceedings, Fraunhofer Verlag.

Dashkovski, S., Wirth, F., Jagalski, T. (2006). Autonomous control of shop floor logistics: analytic models. In: Chryssolouris, G., Mourtzis, D.H. (Eds.), Manufacturing, Modelling, Management and Control, Elsevier Science Ltd.

Forrester, J., 1958. Industrial Dynamics - A Major Breakthrough for Decision Makers. Harvard Business Review 36, pp. 37-66.

Günther, H.O., Tempelmeier, H. (2005) Produktion und Logistik. In: Springer-Online.

Hopp, W. J., Spearman, M.L. (2001) Factory physics: foundations of manufacturing management. Irwin McGraw-Hill, Boston [u.a.]. 2. ed. edition.

Nyhuis, P., Wiendahl, H., Rossi, R., 2008. Fundamentals of Production Logistics: Theory, Tools and Applications. Springer.

Philips, C., Harbor, H. (2000) Feedback Control Systems. Prentice-Hall. 4th edition.

Scholz-Reiter, B., de Beer, C., Freitag, M., Hamann, T., Rekersbrink, H., Tervo, J.T. (2008) Dynamik logistischer Systeme, In: Nyhuis, P. (Ed.), Beiträge zu einer Theorie der Logistik, Springer, Berlin.

Scholz-Reiter, B., Kolditz, J., Hildebrandt, T., Höhns, H., (2006) Modellierung selbststeuernder logistischer Prozesse in der Produktion, In: Karagiannis, D., Rieger, B. (Eds.), Herausforderungen in der Wirtschaftsinformatik – Festschrift für Hermann Krallmann, Springer, Berlin.

Scholz-Reiter, B., de Beer, C., Freitag M., Jagalski, T. (2007) Analysing the Dynamics caused by Automously Controlled Logistic Objects, In: ElMaraghy, H. A, Zaeh, M. F.(Eds.), Proceedings of 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2007), University of Windsor, Toronto, Canada, pp. 237-280.

Wiendahl, H., Breithaupt, J.W. (2000) Automatic production control applying control theory. International Journal of Production Economics 63, pp. 33 – 46.

Windt, K., 2006. Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik, In: Vec, M., Hütt, M., Freund, A. (Eds.), Selbstorganisation Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft, Böhlau Verlag, Köln, pp. 271–314.

Windt, K., Becker, T., Jeken, O., Gelessus, A. (2010a) A Classification Pattern for Autonomous Control Methods in Logistics. Logistics Research 2, pp. 109–120.

Windt, K., Jeken, O., Gebhardt, N. (2010b) Nutzung und Erweiterung von Flexibilitätspotenzialen in Fertigung und Montage durch Selbststeuerung und Konstruktion, In: Nyhuis, P. (Ed.), Wandlungsfähige Produktionssysteme. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB), GITO, Hannover, pp. 65–82.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Simulation komplexer (IT) Service-Infrastrukturen

Simulation of complex IT service infrastructures

Joachim Winkler, Benjamin Heisig, synetics GmbH, Düsseldorf (Germany),
jwinkler@synetics.de, bheisig@synetics.de

Achim Schmidtmann, Fachhochschule Dortmund, Dortmund (Germany),
achim.schmidtmann@fh-dortmund.de

Abstract: The project SIMKOSI deals with the development of a simulation model, which, fed by the data of a CMDB system, provides a representation of the relationships, dependencies and structures of the underlying ICT Infrastructure and the IT Services based on it. This model forms the basis for a variety of simulation processes that enable pro-active and forward-looking action even with insufficient or incompletely planned changes. Furthermore, the simulation model must provide an as complete as possible picture of current and prospective ICT environments with all their imaginable variations. In a further step, a prototype simulator is developed which allows a pre-designed methodology following specific simulation experiments for analysis, diagnosis and planning. This paper will demonstrate the current state of the solution and thereby address the key technical requirements that were associated with the realization.

1 Einführung

IT-Verantwortliche stehen heute vor der Situation, eine immer komplexer werdende Systemlandschaft (intern und outgesourced sowie häufig verteilt) mit knapp kalkulierten Budgets sicher und verfügbar betreiben zu müssen. Damit einher gehend wachsen rechtliche und gesetzliche Anforderungen an die Regeltreue (Compliance) des Unternehmens, und auch die persönliche Haftung von Verantwortlichen und Mitarbeitern rückt zunehmend in den Mittelpunkt.

Lösungsansätze wie ITIL (IT Infrastructure Library) (Böttcher 2010) oder CobiT (Control objectives for information and related technology) (Gaulke 2010) haben hier in den vergangenen Jahren durch neue Methoden und eine prozessorientierte Verwaltungssicht unterstützen können, die Umgebungen „im Griff“ zu behalten. Allerdings zeichnen sich auch derart verwaltete Informations- und Telekommunikationstechnologie (ITK)-Infrastrukturen weitgehend durch eine reaktive Handlungsweise aus, da den zugrunde liegenden Werkzeugen in der Regel die Eigenschaft fehlt, ein „Verständnis“ für die zu verwaltende ITK-Infrastruktur zu entwickeln.

Mit der hier verfolgten Idee soll eine Lösung geschaffen werden, die es Entscheidern, Planern und Administratoren erlaubt, ad-hoc-Simulationen ihrer ITK-Infrastruktur "auf Knopfdruck" auszuführen. IT-Verantwortliche sollen bei einfacher Handhabung und großer Flexibilität beliebige "Was-wäre-wenn?"-Szenarien zur eingesetzten IT-Umgebung durchspielen können. So entsteht ein neuartiges proaktives Assistenzsystem für strategische IT-Planung und operativen Betrieb.

Ziel des Vorhabens ist, den Anwendern eine neue Qualität in der Repräsentation der Daten zu liefern, die für Betrieb, Wartung und Weiterentwicklung im Sinne von Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit ihrer IT-Umgebungen notwendig sind. Die Simulation soll dabei als Open-Source Software mit offener I/O-Schnittstelle entwickelt werden, so dass eine Adaption an unterschiedliche CMDB-Lösungen nicht nur mit geringem Aufwand möglich ist, sondern auch ein möglichst breiter Nutzerkreis erreicht werden kann.

In diesem Beitrag wird der aktuelle Stand der Lösung demonstriert und dabei auf die wesentlichen technischen Anforderungen eingegangen, die mit der Realisierung verbunden waren und sind. Neben der Entwicklung einer Anbindung respektive Schnittstelle zu verschiedensten CMDBs soll insbesondere die praktische Simulation von Last- und Ausfallszenarien auf Basis des prototypisch erstellten Simulators dargestellt werden.

2 Stand der Technik

Aktuelle Lösungen beschränken sich bisher auf die Bereitstellung stabiler IT-Services. Sie gehen dabei in erster Linie reaktiv vor und ermöglichen nur begrenzte Vorausplanungen. Die hier vorgestellte Simulation SIMKOSI dagegen unterstützt ein pro-aktives und vorausschauendes Handeln auch bei nicht ausreichend oder vollständig geplanten Änderungen (Changes) von IT-Services bzw. ITK-Infrastruktur.

Bei dem geplanten Vorhaben geht es weniger um die Einführung neuer Technologien, als um neue „Sichtweisen“, oder besser: eine neue und auf einer fundierten Analyse und umfassenden Klassifikation der aktuellen Situation basierende Methodik, mit den Anforderungen aus Betrieb und Entwicklung von ITK-Infrastrukturen umzugehen. Dieses Projekt stellt große Anforderungen, da sowohl eine möglichst vollständige Abbildung aktueller und zu erwartender ITK-Infrastrukturen mit all ihren Variationsmöglichkeiten als auch eine hochgradig fundierte Methode zur Simulation umgesetzt werden soll.

Im Bereich der IT-Service-Infrastrukturen, wird ein derartiger Ansatz bisher nur sehr begrenzt verfolgt. Allerdings kann auf Parallelen zu Arbeiten über komplexe Infrastrukturen in anderen Themenbereichen zurückgegriffen werden. In diesen wurden u.a. Modelle kritischer interdependenter Infrastrukturen (Energie/Verkehr) (Casalicchio et al. 2009; Klein 2009; Hecht 2002; Hecht et al. 2002) und komplexer Produktions- und Logistiknetzwerke entwickelt (Laroque 2007; Dangelmaier et al. 2007; Motta et al. 2008) und auf deren Basis Simulationsstudien zur Analyse vielfältiger Untersuchungszwecke durchgeführt.

Technische Simulationen von Rechnern wie z.B. Schaltungssimulationen und auch die Simulation von Computernetzwerken sind theoretisch bereits sehr detailliert betrachtet worden und auch in der Praxis in den unterschiedlichsten Bereichen

bereits stark verbreitet (Liebl 1995; Pidd 1989; Pidd 1992). Dies ist beispielsweise an den zahlreichen verfügbaren Simulationswerkzeugen und -umgebungen zu erkennen, die heute angeboten werden (Kuhn et al. 1993). Im Bereich der Netzwerksimulation haben sich diese allerdings noch nicht bis in die Unternehmen durchgesetzt und werden vorrangig nur im akademischen Umfeld verwendet.

Ein Grund hierfür ist der hohe Zeitaufwand, der notwendig ist um eine Simulation durchführen zu können. Dies liegt darin begründet, dass die Netzwerkdaten manuell in den jeweiligen Simulator eingegeben werden müssen, um das Modell für die Simulation zu erzeugen. Es fehlt eine automatisierte Übermittlung der Daten zum Beispiel zwischen CMDB und Simulator. Der Zeitaufwand ist dabei besonders bei der Simulation von großen Computernetzwerken, wie sie von großen Unternehmen betrieben werden, sehr hoch.

Aktuelle CMDB-Lösungen haben einen unterschiedlichen Reifegrad und bei den Anbietern entsprechender Lösungen und Produkte ist ein diversifiziertes Verständnis zu Funktionsweise und Definition einer CMDB festzustellen. Bei der Berücksichtigung der im Markt etablierten Lösungen lassen sich fünf Kernbereiche ausmachen, die eine CMDB auszeichnen:

- Federation: Die Fähigkeit, Daten aus beliebig vielen Quellen einzusammeln.
- Reconciliation: Kommt dann zum Einsatz, wenn eine IT-Komponente in mehreren Quellen auftaucht, dort aber jeweils mit unterschiedlichen technischen Angaben dokumentiert ist.
- Mapping: Das Abbilden eines gesammelten Ist-Datenbestands auf einen Soll-Datenbestand mit Hilfe von Validierungsregeln.
- Visualisierung: Spielt eine wesentliche Rolle, wie sich komplexe Zusammenhänge überhaupt darstellen lassen.
- Synchronisation: Datenbestände mit den diversen Quellen abgleichen.

Diese Funktionen werden von den verfügbaren Lösungen in unterschiedlichem Umfang und Detaillierungsgrad abgebildet und erlauben somit eine ebenso mehr oder weniger umfassende, konsolidierte Sicht auf die ITK-Umgebung (Computerwoche 2008; Haberstroh 2008)

Weiterhin gibt es im ITIL V3 Rahmenwerk zwar in der Phase Service Design die Component Failure Impact Analysis (CFIA) (OGC 2007), eine Technik mithilfe derer die Auswirkungen eines CI-Ausfalls auf IT Services ermittelt werden können. Dabei werden über eine Verfügbarkeitsmatrix IT-Strukturen und -abhängigkeiten herausgestellt, so dass kritische CIs und anfällige IT Services identifiziert werden können (Köhler 2007). Allerdings ist diese Methode rein manuell und bietet keine direkte Anbindung an eine CMDB zur automatischen Durchführung. Somit ist sie sehr aufwändig in der Umsetzung und fehleranfällig.

Da das vollständige Abbilden der Objekte, Beziehungsdaten und Abhängigkeiten aus der CMDB in einem Modell eine wesentliche Voraussetzung für Simulationen ist und bis heute noch nicht umgesetzt wurde, gibt es aktuell keine entsprechenden Modelle, die die hier beabsichtigten Lösungsansätze bereits umgesetzt hätten.

Die diskrete ereignisorientierte Simulation hat sich heute als Simulationsart in der Praxis für die Netzwerksimulation durchgesetzt. Gleichzeitig ist sie die einzige Simulationsart, die die aktuell auf dem Markt erhältlichen Simulationsumgebungen

für Computernetzwerke anbieten. Insoweit findet sie in diesem Projekt zu Simulation komplexer (IT) Service-Infrastrukturen Verwendung.

3 Realisierung

Den Anfang des Projektes bildeten eine detaillierte Analyse bestehender CMDBs und eine umfassende Klassifikation von Schwachstellen in Service-Infrastrukturen sowie eine Auswirkungsanalyse dieser Problemfelder. Dabei galt es auch absehbare zukünftige Entwicklungen von ITK-Umgebungen und Servicelandschaften im Blick zu haben.

Die Ergebnisse dieser Recherche flossen direkt in die Anforderungen an das zu entwickelnde Simulationsmodell ein, welches die Basis einer modellbasierten Analyse und Diagnose darstellt. Neben einer möglichst vollständige Abbildung aktueller und zukünftiger ITK-Umgebungen mit all ihren Variationsmöglichkeiten durch das Simulationsmodell soll der prototypisch entwickelte Simulator durch die Konzeption einer Abstraktionsschicht (offene I/O-Schnittstelle) zur Integration alternativer Technologien (CMDBs) und die Integration einer ergonomischen Benutzerschnittstelle eine möglichst breite Varianz seines Einsatzfeldes bieten. Einerseits gilt es Daten aus verschiedenen CMDBs im Simulationsmodell abbilden und verarbeiten zu können und andererseits muss auch das Thema Oberflächengestaltung und Bedienkonzept betrachtet werden, um den jeweiligen Anwendern eine komfortable und leicht erlernbare Bedienung des Simulators zu ermöglichen.

Im Weiteren wird die prototypische Umsetzung des Simulators als wichtiger Meilenstein im Projekt näher erläutert. Das Simulationsmodell und die CMDB-Schnittstelle wurden dabei beispielhaft anhand der Open-Source-Anwendung i-doit (synetics 2013) ausgearbeitet. Als Simulator wurde OMNeT++ (Varga 2013). Sowohl i-doit als auch OMNeT++ werden im Folgenden noch genauer vorgestellt.

3.1 Anbindung CMDB - Simulator

Wie bereits erläutert, besteht das Ziel des Projekts in der Entwicklung eines Simulationsmodells, das, gespeist von den Daten eines CMDB-Systems, eine Repräsentation der Beziehungen, Abhängigkeiten und Strukturen der zugrunde liegenden ITK-Infrastruktur liefert und diese für die darauf aufsetzenden Simulationsprozesse nutzbar macht.

Die umgesetzte Schnittstelle (Kruse 2012) zwischen der Dokumentations- und Configuration Management Database(CMDB)-Anwendung „i-doit“ und dem Simulator „OMNeT++“ setzt genau an dieser Stelle an und macht die Benutzereingaben der Infrastrukturdaten innerhalb des Simulators überflüssig Hierdurch wird der hohe Zeitaufwand aufgrund der sonst notwendigen und sehr umfassenden Dateneingabe deutlich reduziert. Alle relevanten Daten, die für die Erzeugung des Netzwerkmodells im Simulator benötigt werden, werden vollständig aus den Datenbeständen der CMDB übernommen. Die Daten werden dabei so umgewandelt, dass sie direkt im Simulator genutzt werden können und der Benutzer sofort Simulationen durchführen kann (s. Abb. 1).

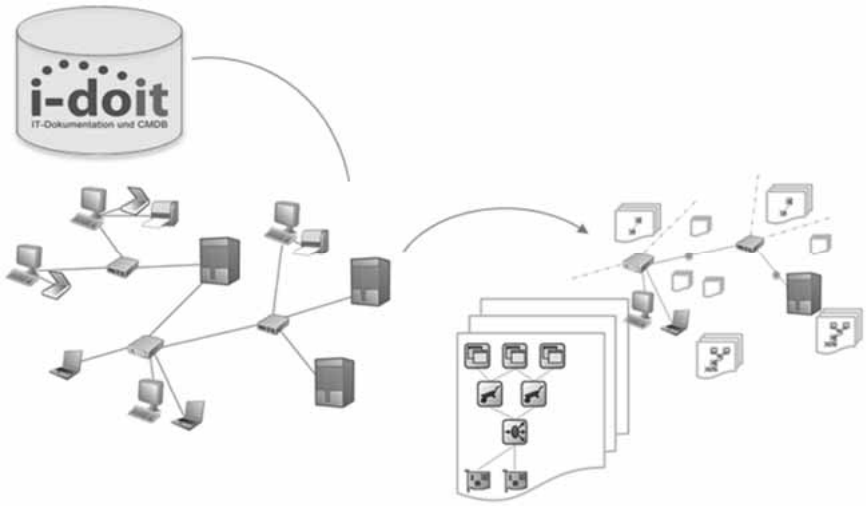


Abbildung 1: *Schnittstelle CMDB-Simulationsmodell-Simulator*

Welche Daten und mit welchem Detaillierungsgrad aus der CMDB in den Simulator zu übertragen sind, ist abhängig von den darauf durchzuführenden Simulationsarten und dem zu betrachtenden Teil der ITK-Infrastruktur. Es sollte möglich sein, unterschiedliche Simulationsarten für verschiedene Problemstellungen zu wählen. Die folgende Liste führt die häufigsten Simulationsanalysen an (Kruse 2012):

- Lastanalyse
  - Reine Lastanalyse
  - Analyse von Serverbelastungen
  - Analyse des Antwortverhaltens bestimmter Komponenten
  - Analyse der Strom- bzw. Wärmelast
- Performanceanalyse
- Konsolidierungsanalyse
- Erweiterungsanalyse (Integration neuer SW/HW)
- Ausfall-/ „Was-wäre-wenn?“-Analyse

Die Liste verdeutlicht bereits, dass es bei einigen Analysen um einzelne Server oder auch einzelne Komponenten geht, die bzgl. ihrer Belastung oder Performance untersucht werden. In diesen Fällen müssen für die Simulation nur Daten aus einem recht beschränkten Teilbereich zur Verfügung stehen, allerdings ist mehr Detailtiefe gefordert als bei den meisten Analysen, die Daten aus größeren Bereichen oder sogar der gesamten ITK-Infrastruktur prüfen. Dementsprechend gilt es die Anforderungen an die Simulation mit den in der CMDB vorhandenen Daten abzustimmen und gegebenenfalls die Daten zu ergänzen oder die Anforderungen den Datenbeständen anzupassen.

Unabhängig von der intendierten Simulationsart kann aus den Netzwerkdaten einer gut strukturierten und gepflegten CMDB über diese Anbindung unmittelbar ein lauffähiges Modell im Simulator erzeugt werden. Unternehmen können auf diese Weise ihre bestehenden Datenbestände nutzen, um präventive Analysen und daraus

resultierende Maßnahmen für den störungsfreien Ablauf ihres Netzwerkes zu unternehmen.

Im Projekt wurde die Open-Source CMDB i-doit ausgewählt, sie bietet 33 verschiedene Komponenten, die direkt verwendet werden können. Daneben ist es auch möglich, individuelle Objekte anzulegen. Die Attribute der einzelnen Komponenten sind ebenfalls flexibel erweiterbar. Dieses bedeutet für die Schnittstelle, dass sie nicht auf eine feste Anzahl an Komponenten begrenzt sein darf, sondern individuelle Anpassungen unterstützen muss. Außerdem existieren 29 vorgefertigte Beziehungsarten in i-doit, die auch individuell ergänzt werden können.

Der Datenzugriff ist bei i-doit über zwei Schnittstellen möglich. Einerseits besitzt es eine XML-Schnittstelle über die Daten importiert als auch exportiert werden können. Andererseits bietet i-doit eine Schnittstelle, die die JavaScript Object Notation, kurz JSON, verwendet. Im Gegensatz zur XML-Schnittstelle ermöglicht es diese, nur die Daten zu exportieren, welche auch für die Simulation benötigt werden, so dass sie ausgewählt wurde (synetics 2013).

3.2 Simulator

In einem weiteren Schritt wurde nun ein prototypischer Simulator auf Basis des Simulationsframeworks „OMNeT++“ entwickelt, das einer im Vorfeld konzipierten Methodik folgend gezielte Simulationsexperimente zur Analyse, Diagnose und Planung ermöglicht. OMNeT++ besitzt keine eigenen Komponenten für die Erstellung von Modellen zu Simulationszwecken, so dass es notwendig war bzw. ist, die entsprechenden Komponenten selbst zu erstellen, bevor ein Modell erzeugt werden kann. In OMNeT++ kann eine Hierarchie mit beliebig vielen Stufen erzeugt werden. Die oberste Stufe stellt dabei immer das Netzwerkmodell an sich dar. Die Verbindung zwischen den einzelnen Komponenten geschieht über Verbindungen (engl. channels), von denen es drei verschiedene Arten gibt, die allerdings auch durch eigene ergänzt werden können (Kruse 2012; Varga 2013).

Um nun einen Simulationslauf durchzuführen, müssen im Simulator noch einige Rahmenparameter gesetzt werden, die „Stellparameter“ der eigentlichen Simulation und damit abhängig von der jeweiligen Simulationsart sind. Diese stellen z.B. gewisse Ober- oder Untergrenzen für Parameterwerte oder auch Zeitvorgaben für den Simulationslauf dar und werden in einer Konfigurationsdatei festgelegt. Jeder Konfigurationsdatei ist genau einem Simulationsmodell zugeordnet. Um die Simulation mit verschiedenen Parametern nacheinander ablaufen zu lassen, können auch mehrere Konfigurationen (-dateien) verwendet werden.

Die Darstellung der Simulationsarten im vorangehenden Abschnitt hat gezeigt, dass neben der Kapazitätsplanung (historische und prognostizierte Lastentwicklungen, Konsolidierungsanalysen, etc.), der Trendanalyse (frühzeitige Erkennung von potentiellen Störungen) und dem Risikomanagement (Ausfallszenarien, „Was wäre wenn?“-Analysen) das Modell auch zur Ursachenfindung und Eingrenzung akuter Ausfälle oder Störungen innerhalb der ITK-Infrastruktur genutzt werden kann. Abbildung 2 stellt den Gesamtzusammenhang zwischen CMDB, Simulationsmodell und Simulator noch einmal umfassend dar.

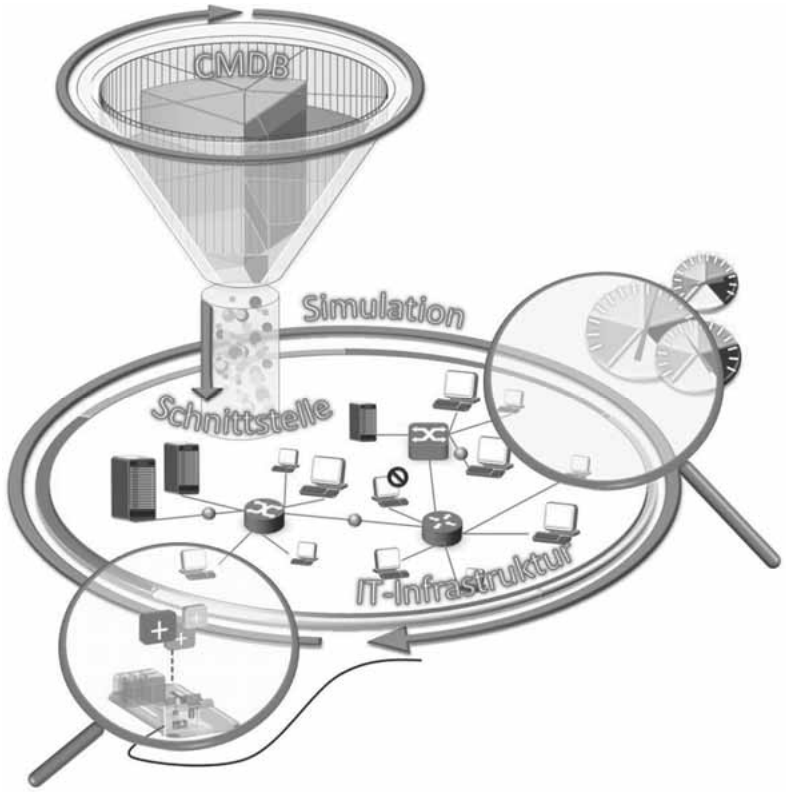


Abbildung 2: *Simulation komplexer (IT) Service-Infrastrukturen*

Im Rahmen des Projekts konnten bisher erste prototypische Stromsimulationen sowie Wärmesimulationen in OMNeT++ realisiert werden. Erstere umfassen die Simulation von Ausfällen und der Überlastung von Komponenten wie z. B. Steckdosenleisten. Gleichzeitig ermitteln sie den Gesamtverbrauch der einzelnen Komponenten und können dabei auch die Schwankungen des Stromverbrauchs durch unterschiedliche Auslastungen simulieren. Das Wärmeszenario basiert auf den Real- und Maximalwerten der verschiedenen Verbraucher der ITK-Infrastruktur, damit ist es zwar eine eher statische Betrachtung, die allerdings bereits das Ermitteln bestimmter Hotspots ermöglicht.

4 Fazit und Ausblick

Als Ergebnis des Vorhabens liegen somit umfangreiche Informationen über bestehende CMDBs, eine umfassende Klassifikation von Schwachstellen in Service-Infrastrukturen, ein auf der betrachteten CMDB i-doit basierendes Simulationsmodell und ein prototypischer Simulator vor. Insbesondere letzterer wird Verantwortlichen und Betreibern als Werkzeug dienen, um Betrieb, Planung und Entwicklung der ITK-Umgebung auf Basis einer gesicherten Datenlage zu ermöglichen. Unter einer „gesicherten Datenlage“ (Baseline) wird hier die Abbildung des IST-Zustandes als Grundlage für die Simulation verstanden, die

System-, Leistungs- und Beziehungsdaten umfassend berücksichtigt. Diese ist durch eine gut strukturierte und gepflegte CMDB sichergestellt.

Die prototypische Umsetzung der beiden Simulationsszenarien auf Basis von i-doit und OMNET++ hat verdeutlicht, welche Möglichkeiten der Erkenntnisgewinnung dieser Lösungsansatz bietet. Die erreichten Ergebnisse gilt es nun in mehrere Richtungen zu erweitern. So ist geplant, weitere Simulationsarten mit dem Simulator umzusetzen. Daneben müssen die CMDBs als Datenquellen des Simulationsmodells noch eingehender untersucht und die Anbindung weiterer CMDBs an den Simulator ermöglicht und getestet werden. Schließlich gilt es die Benutzerfreundlichkeit des Simulators zu verbessern, um eine einfache Handhabbarkeit der Simulationssteuerung und -auswertung zu gewährleisten.

Danksagung

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Projekts „SIMKOSI – Simulation von komplexen Service-Infrastrukturen“ entstanden. Das Projekt wird mit Mitteln des EFRE, „Europäischer Fonds für regionale Entwicklung“, und unter dem Slogan „Europa – Investition in unsere Zukunft“ gefördert (Förderkennzeichen 005-1112-009).

Literatur

Böttcher, R.: IT-Servicemanagement mit ITIL V3. 2. aktualisierte Auflage, Heise, Hannover, 2010.

Casalicchio, E.; Galli, E.; Tucci, S.: Modeling and Simulation of Complex Interdependent Systems: A Federated Agent-Based Approach. Critical Information Infrastructure Security, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5508. Springer Berlin Heidelberg, 2009, p. 72. Chichester, 1992.

Computerwoche: Die CMDB - Drehscheibe für IT-Services, Februar 2008, http://www.computerwoche.de/software/software-infrastruktur/1855356/, zuletzt geprüft am 09.06.2013.

Dangelmaier, W.; Mahajan, K. R.; Aufenanger, M.; Seeger, T.: Simulation assisted match-up rescheduling of flexible production systems subject to execution exceptions. Winter Simulation Conference 2007, p. 1805-1813.

Gaulke, M.: Praxiswissen COBIT - Val IT - Risk IT: Grundlagen und praktische Anwendung für die IT-Governance. Berlin, Heidelberg: dpunkt-Verl. 2010.

Haberstroh, G.: CMDB ist für die Qualität des IT-Service-Managements bestimmend, August 2008, http://www.computerpartner.at/sites/dynamic.pl?id=news20080805131652443, zuletzt geprüft am 09.06.2013.

Hecht, M.: Prediction of Information System Availability in Mission Critical and Business Critical Applications". Twelfth Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE), 2002.

Hecht, M.; Handal, J.: A Discrete-Event Simulator for Predicting Outage Time and Costs as a Function of Maintenance Resources. Proceedings of the 2002 Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Seattle, Washington, 2002.

Klein, R.: Information Modelling and Simulation in Large Dependent Critical Infrastructures – An Overview on the European Integrated Project IRRIIS

Critical Information Infrastructure Security Lecture Notes in Computer Science, 2009, Volume 5508. Berlin, Heidelberg: Springer 2009, p. 131-143.

Köhler, Peter T. (2007): ITIL. Das IT-Servicemanagement Framework. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer 2007.

Kruse, T.: Entwicklung einer Schnittstelle für die Interaktion zwischen einer CMDB und einem Simulator. Dargestellt am Beispiel von i-doit und OMNeT++. Masterarbeit Fachhochschule Dortmund, 2012.

Kuhn, A.; A. Reinhardt; H.-P. Wiendahl: Handbuch Simulations-anwendungen in Produktion und Logistik, Vieweg, Braunschweig und Wiesbaden, 1993.

Laroque, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen, Universität Paderborn, Dissertation, 2007.

Liebl, F.: Simulation. 2. Aufl., Oldenbourg, München, 1995.

Motta, M.; Wagenitz, A.; Hellingrath, B.; Weller, R.: Design of Logistic Networks – A Case Study. Advances in Simulation for Production and Logistics Applications; Markus Rabe (ed.) Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2008.

OGC (2007b): Service Design. Norwich: Office of Government Commerce. The Stationery Office, 2007.

Pidd, M.: Computer modelling for discrete simulation. Wiley, Chichester, 1989.

Pidd, M.: Computer Simulation in Management Science. 3 Aufl., Wiley, 1992.

Synetics GmbH: i-doit: Überblick. Online verfügbar unter http://www.i-doit.com/features/ueberblick/, zuletzt geprüft am 09.06.2013.

Varga, A.: What is OMNeT++? Online verfügbar unter http://www.omnetpp.org/home/what-is-omnet, zuletzt geprüft am 09.06.2013.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Generierung eines Simulationsmodells auf Basis einer CMDB

Generating a simulation model based on the Data of a CMDB

Thorsten Kruse, Achim Schmidtmann, FH Dortmund, Dortmund (Germany),
kruse_thorsten@web.de, achim.schmidtmann@fh-dortmund.de

Abstract: The possibility to use simulations for analyzing local networks to prevent them from malfunctions and disruptions is rarely popular. Reasons for that are the high efforts for modeling the networks within a simulator and the determination of relevant data of the network. In this paper, therefore, an interface is developed that enables the possibility to retrieve the data of a network from a configuration management database and to create the appropriate model for the simulator afterwards. Furthermore, there is a detailed definition of the interface with the goal to build an interface that is flexible concerning future developments. Concluding, the functional capability of the interface is shown in an exemplary simulation.

1 Einführung

Die Grundlage für dieses Projekt bilden die fehlenden Möglichkeiten für Unternehmen präventive Maßnahmen für die Vermeidung von Ausfällen aber auch für die Planung von Erweiterungen und Umstrukturierungen ihrer IT-Infrastruktur. Grundsätzlich bietet sich hierfür die Simulation als geeignetes Mittel für die Analyse der Infrastruktur an, jedoch ist dies nur mit einem hohen Aufwand verbunden. Denn die erforderlichen Modelle und Komponenten in den verfügbaren Simulatoren müssen entwickelt bzw. entworfen werden. Hinzukommend müssen alle relevanten Daten des Netzwerkes erfasst und in die Simulation eingebracht werden. Für Unternehmen, die eine eigene Configuration Management Database, kurz CMDB, betreiben, ist es nahe liegend die Informationen aus dieser für die Simulation zu verwenden. Die Schwierigkeit besteht allerdings darin, die notwendigen Daten an den Simulator zu übergeben, da hierfür keine geeigneten Schnittstellen oder Verfahren existieren. Es ist somit erforderlich diese manuell aus der CMDB in den Simulator zu übertragen.

Das Ziel dieses Projektes ist es daher die oben dargestellte Problematik zu vermeiden, indem die Entwicklung einer geeigneten Schnittstelle dargestellt wird, die die Daten einer CMDB für einen Simulator zugänglich und nutzbar macht,

sodass mit diesem schnell und unkompliziert Simulationen durchgeführt werden können.

2 Anforderungen an die Schnittstelle

Die Aufgabe der Schnittstelle ist es die Daten der CMDB für den Simulator verfügbar zu machen. Wie in Abbildung 1 verdeutlicht ist, muss die CMDB zunächst ihre Daten in ein einheitliches Format konvertieren. Dieses ermöglicht es der Schnittstelle die Daten zu verstehen und diese in ein entsprechendes Modell für den Simulator um zu wandeln.

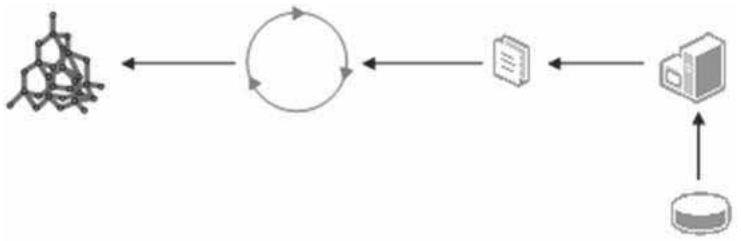


***Abbildung 1**:Ablauf der Modellerzeugung*

Der Schwerpunkt der zu entwickelnden Schnittstelle liegt dabei in der Definition eines einheitlichen Datenformats für den Austausch der Modelldaten. Die Umwandlung dieser Daten in ein Simulationsmodell muss dagegen für jeden Simulator gesondert vorgenommen werden, da diese kein standardisiertes Modellformat unterstützen.

Die Grundlage für die Entwicklung der Schnittstelle bildet die CMDB, welche die relevanten Daten für die Erzeugung eines Simulationsmodells beinhaltet. Diese ist ein Bestandteil des IT-Servicemanagements, wie es von der IT Infrastructure Library (kurz ITIL) und der ISO 20.000 beschrieben wird. Das Ziel des IT-Servicemanagement ist es IT-Leistungen bzw. Services für die Geschäftsprozesse eines Unternehmens bereitzustellen.

Um ein erfolgreiches IT-Servicemanagement umzusetzen haben sich dazu verschiedene Ansätze entwickelt. Sowohl ITIL als auch die ISO 20.000 stellen dabei einen prozessorientierten Ansatz für die Umsetzung des IT-Servicemanagements dar (Buchsein 2007).

In beiden Ansätzen wird die Simulation zwar nicht direkt als Instrument für Vermeidung bzw. Untersuchung von Störfällen vorgeschlagen, jedoch fordert die ISO 20.000 als auch ITIL proaktive Maßnahmen für die Vermeidung von Störungen (Kresse und Bause 2011; ISO/IEC 20000-1 2005).

Die CMDB ist in beiden Ansätzen zentraler Bestandteil des Configuration-Management-Prozess, der für die Pflege dieser verantwortlich ist. Die CMDB ist sowohl in ITIL als auch in der ISO 20.000 für die „Bereitstellung von aktuellen und historischen Informationen über die verfügbaren IT-Services, die damit verbundenen IT-Infrastruktur-Konfigurationselemente und deren Beziehungen untereinander“ (Wischki 2009) verantwortlich. Was für eine Vielzahl von Daten dabei für einen IT-

Service in der CMDB gespeichert werden muss, wird bei einer genauen Betrachtung deutlich. Ein IT-Service ist häufig eine bestimmte Anwendung, die von verschiedenen Clients genutzt wird. Die Anwendung selbst kann dabei z. B. auf einem Server laufen, der zusätzlich eine Datenbank benötigt, um die Daten der Anwendung speichern zu können. Die Datenbank läuft dabei meist ebenfalls auf einem oder mehreren Servern, welche ihre Daten möglicherweise in einem Speichersystem physikalisch hinterlegt haben. Um alle beteiligten Komponenten miteinander zu verbinden, wird zusätzlich ein Netzwerk benötigt, dass diese miteinander in Beziehung setzt und die Kommunikation ermöglicht. Außerdem benötigen alle Komponenten Strom, um überhaupt funktionieren zu können, wodurch Bedarf nach einem Stromnetz besteht. Abschließend ist zu berücksichtigen, dass alle genannten Bestandteile des IT-Service in einem bestimmten Raum und Gebäude untergebracht sind (Wischki 2009).

Neben den oben genannten Bestandteilen eines IT-Service muss darüber hinaus beachtet werden, dass jede Komponente aus unterschiedlich vielen Attributen und Parametern bestehen kann, wie z. B. ein Server, der aus verschiedenen Hardware-Komponenten besteht, die alle in der CMDB mit erfasst werden müssen. So wird deutlich, dass eine sehr detaillierte Erfassung aller Komponenten erforderlich ist und innerhalb der CMDB ein genaues Abbild der IT-Infrastruktur entsteht. Diese Genauigkeit ist allerdings keinesfalls unverhältnismäßig. Ein Ausfall der Klimaanlage des Rechenzentrums führt beispielsweise dazu, dass irgendwann die Server überhitzen, diese ausfallen oder sich selbstständig herunterfahren und der IT-Service für den Kunden nicht mehr zur Verfügung steht. Der Nutzen der CMDB wäre nun verfehlt, wenn das Problem in dieser erfasst werden soll und die relevante Komponente Klimaanlage nicht vorhanden ist, da sie nicht direkt am IT-Service beteiligt ist und deshalb nicht berücksichtigt wurde.

Wie die Betrachtung der CMDB zeigt, können umfangreiche Daten über die IT-Infrastruktur und deren Umfeld erfasst werden. Für die Schnittstelle bedeutet dies, dass sie möglichst alle Daten übertragen sollte, um eine möglichst breite Auswahl von unterschiedlichen Simulationsanalysen zu ermöglichen. Dabei müssen auch die unterschiedlichen Parameter der einzelnen Objekte der CMDB und auch die Vielzahl von möglichen Beziehungen unter den Objekten berücksichtigt werden. Hinzukommend muss die Schnittstelle auch zukunftssicher sein, um neue Komponenten übertragen zu können.

3 Definition der Schnittstelle

Grundsätzlich können die Daten einer CMDB in drei Bestandteile aufgegliedert werden – Objekte, Parameter, Beziehungen. Zu den Objekten zählen alle Komponenten die in der CMDB abgebildet werden können, wie z. B. Server, Router, aber auch Mitarbeiter, Serviceverträge und Peripheriegeräte. Die Beziehungen unter den Objekten ermöglichen es verschiedene Modelle in der CMDB anzulegen, wie z. B. Datennetze, Stromnetze o.ä.

Sowohl die Objekte in einer CMDB als auch die Beziehungen zwischen diesen, können Parameter besitzen, wie z. B. eine Übertragungs- oder Prozessorgeschwindigkeit. Für jede Simulation müssen die relevanten Parameter bereitgestellt werden, um diese überhaupt erst zu ermöglichen. Für die Definition der Schnittstelle bedeutet dies, dass alle drei Bestandteile berücksichtigt werden

müssen. In Algorithmus 1 ist die daraus resultierende Schnittstelle beispielhaft an einem Cluster dargestellt. Das Wurzelelement erlaubt es einen Namen als auch das Erstellungsdatum für das Modell anzugeben.

Algorithmus 1: *Definition der Schnittstelle*

```
<model name=“Ausfallsimulation“ date=“2012-07-03T09:00:00“>
      <component id=”10” name=“Cluster“ type=“Cluster“>
            <parameter name=”Arbeitsspeicher”>
                  <value>1024</value>
                  <unit>MB</unit>
            </parameter>

            <component name=”Server 1” type=”Server”>
                  …
            </component>
      </component>
      <connection master=”true”>
            <from>
                  <id>10</id>
                  <name>Client1</name>
            </from>
            <to>
                  <id>9></id>
                  <name>Server1</name>
            </to>
            <direction>both</direction>
            <kind>network</kind>
            <parameter name="Übertragungsrate">
                  <value>1</value>
                  <unit>Gbit/s</unit>
            </parameter>
      </connection>
</model>
```

Das erste Unterelement der Schnittstelle stellt die Objekte dar, die in der CMDB abgebildet werden können. Eine Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Arten wird dabei durch das Attribut *Type* vorgenommen. Der Simulator kann dadurch die Komponenten unterscheiden und entsprechend in der Simulation berücksichtigen. Als weitere Attribute können eine ID und ein Name für das Objekt angegeben werden, wodurch eine Identifizierung durch den Anwender ermöglicht werden soll.

Als Unterelement der Komponenten können sowohl die für die Simulation erforderlichen Parameter als auch andere Komponenten angegeben werden. Für einen Computer können beispielsweise die einzelnen Hardware-Bestandteile als eigene Komponenten innerhalb der XML-Komponente angegeben werden. Abhängig von der Simulationsart und vom Detaillierungsgrad kann dies notwendig sein, wenn die Angabe von z. B. der Größe des Arbeitsspeichers oder der Prozessorgeschwindigkeit als Parameter nicht ausreichend ist und stattdessen detailliertere Informationen über die einzelnen Bestandteile erforderlich sind.

Die Parameter der Komponenten besitzen einen Namen, welcher ebenfalls zur Identifizierung sowohl für den Simulator als auch durch den Anwender erforderlich ist. Darüber hinaus kann ein entsprechender Wert und die zugehörige Maßeinheit angegeben werden. Hierdurch sollen Umrechnungsfehler zwischen der CMDB und dem Simulator vermieden werden. Für Parameter ohne Maßeinheit kann die Angabe dagegen entfallen.

Als letztes werden die Beziehungen zwischen den Objekten als separate XML-Komponenten in der Schnittstelle angegeben. Eine Zuordnung als Unterelement zu einem Objekt ist hier nicht möglich, da grundsätzlich zwei Objekte an einer Beziehung beteiligt sind. Für den Simulator ist es dadurch auch möglich die Beziehungen unabhängig von den Objekten zu verarbeiten.

Wie auch bei den Objekten tritt für Beziehungen ebenfalls die Problematik auf, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Arten existiert. Unterschieden werden kann hier zwischen logischen und physikalischen Beziehungen. Während für logische Beziehungen, wie z. B. eine Master-Slave-Beziehung häufig weniger Informationen übertragen werden müssen, werden für physikalische Verbindungen wie z. B. Datenverbindungen abhängig von der Simulationsart und dem Detaillierungsgrad deutlich mehr Informationen bzw. Parameter benötigt. Eine der grundlegendsten Informationen ist dabei die Richtung in die die Verbindung besteht. Diese Angabe entscheidet darüber, wie die Daten über das Netzwerk gesendet werden dürfen. So kann die Datenübertragung beispielsweise nur von Komponente A zu B erfolgen. In der Kommunikationstechnik wird dabei zwischen drei verschiedenen Arten unterschieden – Simplex, Halbduplex, Duplex.

Im Simplex-Betrieb können Daten lediglich in eine Richtung gesendet werden, also beispielsweise nur von Objekt A zu Objekt B. Der Halbduplex-Betrieb ermöglicht es dagegen, die Kommunikation in beide Richtungen durchzuführen. Hierbei kann allerdings immer nur ein Objekt Daten übertragen, sodass die Objekte immer nur abwechselnd Daten senden können. Anders ist dies im sogenannten Duplex-Betrieb. Dieser ermöglicht es, den verbundenen Objekten gleichzeitig Daten über dieselbe Verbindung zu senden. Die Wartezeiten, während ein anderes Objekt Daten überträgt, entfallen daher vollständig (Zenk 2004).

Neben der Datenübertragung müssen aber auch Informationen wie z. B. die Übertragungsgeschwindigkeit oder die Kabellänge angegeben werden können. Wie bereits bei den Objekten sind die relevanten Parameter abhängig von der jeweiligen Simulationsart und dem Detaillierungsgrad des Modells. Um die Flexibilität der Schnittstelle zu gewährleisten müssen zu einer Verbindung daher auch beliebige Parameter angegeben werden können. Hierzu wird das gleiche Prinzip wie bei den Objekten verwendet.

Um festzulegen, zwischen welchen Komponenten die Verbindung hergestellt wird, werden im oben dargestellten XML-Element die Namen und die IDs der jeweiligen Objekte eingetragen. Dadurch ist eine eindeutige Identifizierung der an der Verbindung beteiligten Komponenten durch den Simulator möglich. Die Unterscheidung der Objekte durch *from* und *to* bezieht sich an dieser Stelle nicht auf die Übertragungsrichtung der Daten, sie wird lediglich für das Unterelement *direction* benötigt. Hier kann zwischen l*eft*, *right* und *both* ausgewählt werden, wodurch die Übertragungsrichtung der Verbindung festgelegt wird. Im Fall von *left* erfolgt die Datenübertragung von links nach rechts, also von der Komponente, die

im Element *from* steht, zu der Komponente im Element *to*. Im umgekehrten Fall *right* erfolgt die Kommunikation dagegen in die entgegengesetzte Richtung, also von rechts nach links. Ohne die Unterscheidung von *from* und *to* wäre hier eine genaue Festlegung der Richtung der Datenübertragung nicht möglich, sodass, bei einem Import der Daten in einen Simulator die Verbindung falsch interpretiert werden könnte.

4 Durchführung einer Simulationsstudie

Für die Durchführung einer Simulationsstudie wurde die definierte Schnittstelle beispielhaft in den Simulator OMNeT++ implementiert und ermöglicht es so auf die Daten der CMDB i-doit von Synetics zuzugreifen. Mit der Umsetzung ist es möglich Dateien mit den Daten einer CMDB einzulesen und diese in ein entsprechendes Modell des Simulators umzuwandeln. Da die Entwicklung der Schnittstelle nicht an eine spezielle Aufgabe oder Experiment gebunden ist, soll hier beispielhaft ein fiktives und einfaches Stromnetz verwendet werden. In Abbildung 2 ist der Aufbau dieses Netzes in OMNeT++ dargestellt. Vorab ist es allerdings notwendig das Modell in i-doit bzw. einer XML-Datei als Datenaustauschformat abzubilden, um den Import der Daten überhaupt durchführen zu können.

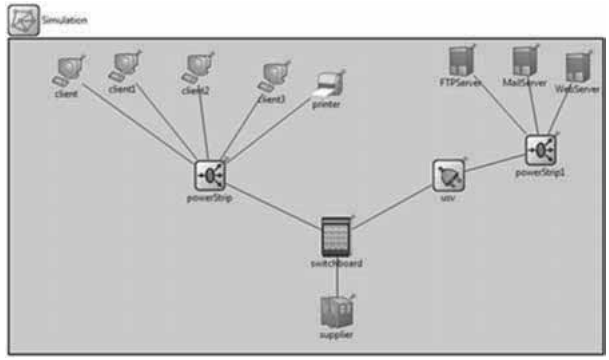


Abbildung 2: *Simulationsmodell*

In diesem Simulation Szenario soll der Ausfall des Stromerzeugers simuliert werden, wodurch alle Komponenten, die nicht an die USV angeschlossen sind ausfallen. Das erwartete Ergebnis dieses Szenarios ist, dass die Simulation den Ausfall erkennt und alle betroffenen Komponenten, die keinen Strom mehr erhalten, markiert und ausfallen lässt. Darüber hinaus muss die USV die Versorgung der angeschlossenen Komponenten übernehmen, wodurch der Ausfall an diesen nicht bemerkbar wird. Daraus resultierend fallen an der USV weiterhin die Stromverbräuche der angeschlossenen Komponenten an, was in diesem Fall durch den Ausfall dem Gesamtverbrauch in der Simulation entspricht.

Für die Durchführung der Simulationsstudie ist es notwendig, dass die Schnittstelle die erforderliche Konfigurationsdatei, siehe Algorithmus 2, erzeugt.

Algorithmus 2: *Konfigurationsdatei der Simulation*

```
[General]
network=Simulation

**.consumption = 100
**.powerStrip.max=1000
**.powerStrip1.max=1000
**.switchboard.max=5000

**.supplier.enabled=false
```

Der Verbrauch der Komponenten ist hier allgemein auf 100 Watt festgelegt und die maximale Leistung der Infrastruktur-Komponenten ist so gewählt, dass sie in dieser Simulation nicht erreicht wird. Weiterführend ist der Stromerzeuger entsprechend der Simulationsaufgabe deaktiviert.

Basierend auf der oben getroffenen Konfiguration erzeugt der Simulator das in Abbildung 3 dargestellte Ergebnis der Simulation.

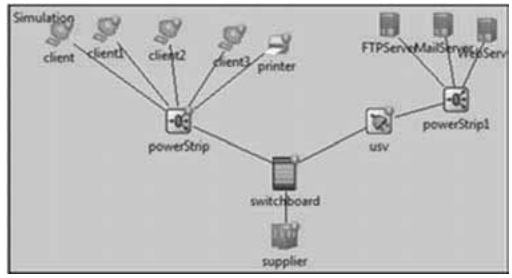


Abbildung 3*:Simulationsergebnis*

Wie zu erkennen ist, sind in der Simulation alle Komponenten, die nicht an die USV angeschlossen sind ausgefallen, was durch das Symbol in der rechten oberen Ecke der Komponenten dargestellt ist. Da die USV vom Ausfall des Stromerzeugers auch betroffen ist, ist diese ebenfalls durch das Symbol gekennzeichnet. Alle folgenden Komponenten sind dagegen vom Ausfall nicht betroffen, da die USV diese weiterhin mit Strom versorgt. Dies ist zudem in der Simulation ersichtlich, da der Stromverbrauch an der USV 300 Watt beträgt, was dem Stromverbrauch der drei angeschlossenen Server entspricht. Der Stromverbrauch, der während der Simulation beim eigentlichen Stromerzeuger gemessen wurde beträgt dagegen 0 Watt.

Die Ergebnisse, die die Simulation dieses Szenarios ergeben hat, entsprechen den oben genannten erwarteten Ergebnissen, die die Simulation im Idealfall gemäß dem realen System erzielen muss. Neben dem Faktor Gesamtverbrauch des Stromnetzes ist dies auch durch die dargestellten Ausfälle in der Simulation ersichtlich. Daraus resultierend stimmt das Verhalten des Modells mit dem des eigentlichen Systems überein, weshalb die Simulation für dieses Szenario verlässliche Ergebnisse erzeugt.

Bei der Betrachtung der Schritte einer Simulationsstudie nach Law und Kelton (1997). Wird außerdem verständlich, dass der Aufwand für den Anwender deutlich reduziert wurde:

1. Problem Formulierung und Definition des Systems/Modells
2. Wahl von Metriken, Faktoren und Stufen
3. Sammeln von Daten und Modellierung
4. Wahl der Simulationsumgebung, Implementierung des Modells und Verifikation
5. Validierung und Empfindlichkeitsanalyse
6. Durchführung der Experimente, Analyse und Präsentation (Law und Kelton 1997)

Die Schritte zwei bis fünf entfallen vollständig und Schritt eins beschränkt sich nur noch auf die Problem Formulierung, da das System bereits durch die CMDB vorgegeben ist. Der Aufwand für die Durchführung einer Simulationsstudie ist somit durch die Schnittstelle deutlich verkürzt worden.

5 Fazit

Mit der hier definierten Schnittstelle ist es möglich die Daten einer CMDB für einen Simulator nutzbar zu machen. Damit dies allgemein für alle CMDBs möglich ist, muss sich diese allerdings erst als Standardschnittstelle etablieren, was ebenfalls auf der Seite der Simulatoren erfolgen muss. Wie die Implementierung in den Simulator OMNeT++ gezeigt hat, müssen die Daten, welche über die Schnittstelle übergeben wurden, in ein Simulator-spezifischen Modell umgewandelt werden. Im Fall von OMNeT++ bedeutet dies neben dem eigentlichen Modell eine entsprechende Konfigurationsdatei, in der die Parameter der Objekte angegeben werden, zu erstellen. Da die Modelle nicht standardisiert sind, muss die Schnittstelle in jeden Simulator einzeln integriert werden, um diese nutzbar zu machen.

Weitergehend müssen für die Schnittstelle Objekt- und Beziehungsarten festgelegt werden, damit die eindeutige Bestimmung von Objekt- und Beziehungsarten für alle Simulatoren und CMDBs gleich ist und keine Differenzen auftreten können. Dafür ist es erforderlich einen Katalog mit allen Arten zu entwerfen und an Änderungen anzupassen.

In weiteren Arbeiten muss die Umsetzung der hier definierten Schnittstelle als Webservice betrachtet werden. Dadurch wäre ein direkter Zugriff auf die Daten der CMDB möglich. Die vorab Umwandlung und das Exportieren der Daten als Datei würde vollständig entfallen und es müssten nur noch für die jeweilige Simulation relevante Modelldaten aus der CMDB ausgelesen werden.

Literatur

Buchsein, R.: IT-Management mit ITIL® V3. Strategien, Kennzahlen, Umsetzung. Wiesbaden: Vieweg 2007.

ISO/IEC 20000-1: Information technology – Service Management – Part 1: Specification. 2005

Kresse, M.; Bause, M.: ITIL v3 – Alles was man wissen muss. Bad Homburg: Serview 2011.

Law, A.; Averill, M.: Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill 2006.

Ray, E. T.: Einführung in XML. Köln: O'Reilly 2004.

Wischki, C.: ITIL V2, ITIL V3 und ISO/IEC 20000. Gegenüberstellung und Praxisleitfaden für die Einführung oder den Umstieg. München, Wien: Hanser 2009.

Zenk, A.: Lokale Netze. Planung, Aufbau, Wartung: München, Boston: Addison-Wesley 2004.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Analyse der Dienstgüte in komplexen IT-Service-Infrastrukturen mittels Simulation

Quality of Services analysis of IT service Infrastructures

Benjamin Gunia, Achim Schmidtmann, Fachhochschule Dortmund, Dortmund (Germany), gunia@stud.fh-dortmund.de, achim.schmidtmann@fh-dortmund.de

Abstract: On the basis of an interface which has been developed, a complex IT service infrastructure can be realistically portrayed in a simulation environment, founded on the information provided by a configuration management database (CMDB). Building on this model, an analysis and optimization of the IT infrastructure is to follow by means of specified metrics on quality of service taken from the area of network planning and optimization. Thus, the simulation of potential changes (for instance an extension of the network or the control of performance with regard to concluded service level agreements in the case of a change) is rendered possible. This simulation or its results respectively finally make it possible to give the change management process, in particular in terms of guaranteeing the monitored execution of the changes, a new form of effectiveness and quality which is not yet possible at the present time.

1 Einleitung

Die Hauptaufgabe von IT-Abteilungen in Unternehmen besteht heutzutage in der Erbringung von Dienstleistungen, die bedarfsgerecht, effizient und mit hoher Qualität bereitgestellt werden. Die Effizienz und Qualität basieren dabei maßgeblich auf der Dienstgüte der zugrundeliegenden IT-Infrastruktur der Computernetzwerke. Dabei stehen die einzelnen Komponenten des Netzwerkes in einer anwendungsbetonten Wechselwirkung, welche die Leistungsfähigkeit und somit den Durchsatz in einem Netzwerk bestimmt. Ist es möglich ein zu untersuchendes Computernetzwerk realitätsnah abzubilden, lässt sich zum einem der aktuelle Zustand des Netzwerkes über verschiedene Metriken aus dem Bereich der Netzwerkplanung/-optimierung klassifizieren und zum anderen lassen sich Prognosen über mögliche Veränderungen (Changes) treffen.

Vor diesem Hintergrund soll eine Anbindung eines CMDB-Systems über eine Schnittstelle an eine Simulationsumgebung nach Kruse (2012) stattfinden. Dadurch wird eine Automatisierung der sonst sehr zeitaufwändigen und komplexen Aufgabe der Modellierung eines realitätsnahen Computernetzwerkes angestrebt, wodurch

eine hohe Wirtschaftlichkeit erzeugt wird. Auf Basis dieses Modells werden dann mittels Simulation Analysen der Dienstgüte durchgeführt

Im Folgenden werden dafür zunächst die Metriken zur Klassifizierung der Quality of Services oder auch Dienstgüte eines Netzwerkes, welche bereits in verschiedenen Dokumenten der ITU-T (International Telecommunication Unit-Telecommunication Standardization Sector) sowie der IPPM WG (IP Performance Metrics Working Group) spezifiziert wurden, beispielhaft vorgestellt. In der darauffolgenden Phase wird das verwendete Schichtenmodell (Hybrides-Referenzmodell), in welches die einzelnen Komponenten eines Netzwerkes eingegliedert werden, vorgestellt. Die Gliederung in ein Schichtenmodell unterstützt dabei konzeptionell die Abbildung der Kommunikation der einzelnen Systeme durch eine hierarchische Aufteilung der für eine Kommunikation benötigten Dienste (Protokolle). Durch eine derartige Zerlegung der Komponenten wird die benötigte realitätsnahe Modellierung des Computernetzwerkes ermöglicht. Abschließend wird die verwendete Simulationsumgebung sowie die Abbildung der IT-Service Infrastruktur Komponenten beispielhaft vorgestellt.

2 Quality of Services (QoS)

Die Quality of Services oder Dienstgüte eines Netzwerkes besitzt ihren Ursprung im Bereich der Netzwerkplanung/-optimierung und wurde von verschiedenen Organisationen spezifiziert.

In den Dokumenten der ITU-T (International Telecommunication Unit-Telecommunication Standardization Sector) wird die Dienstgüte in die folgenden drei Bereiche unterteilt. Die QoS-Maßnahmen zur Sicherstellung der Realisierung von Diensten durch die Einhaltung bestimmter Parameter. Die QoS-Charakteristiken umfassen messbare Größen (Parameter), die das Verhalten der Datenübertragung in einem Netzwerk beschreiben. Abschließend umfassen QoS-Anforderungen die Anforderungen der Anwendungen an das Netzwerk (Siemens 2012). Die IPPM WG (IP Performance Metrics Working Group) wurde von der IEFT (Internet Engineering Task Force) initiiert. Die IPPM Working Group hat eine Reihe an Standardmetriken entwickelt, welche für eine Einschätzung der Leistung, Qualität und Zuverlässigkeit von Netzwerken eingesetzt werden können. Damit die Ergebnisse vergleichbar sind und es auch nach der IPPM als eine Metrik bezeichnet werden darf, müssen für die Durchführung die zwei folgend aufgeführten Bedingungen erfüllt werden. So muss zum einen definiert werden was die quantifizierbare Größe beinhaltet und zum anderen müssen alle Nebenbedingungen welche das Ergebnis beeinflussen beschrieben und definiert werden (Siemens 2012).

Die IPPM spezifizierte dazu ein Rahmenwerk und bestimmte die zu definierenden Größen. Darüber hinaus wurde von der Working Group eine Reihe an Metriken (darunter auch das One Way Delay) definiert. Die vollständige Liste der von der IPPM Working Group entwickelten Metriken ist auf der Website der IEFT (http://datatracker.ietf.org/wg/ippm) aufgeführt.

2.1 Verzögerung auf einem Netzwerkpfades

Eine Verzögerung (engl. Delay) beschreibt die Latenz zwischen der erfolgreichen Übertragung und dem Empfang eines Datenpaketes. Im Folgenden wird

exemplarisch die Analyse eines Netzwerkpfades (Komponenten-übergreifende Analyse) anhand der One Way Delay Metrik vorgestellt. Um darauffolgend die Analyse einer einzelnen Komponente anhand des Paket-Switch exemplarisch vorzustellen.

Die in der Abbildung 1, dargestellte Zeitdauer auf den Zeitachsen der Server und Client -Komponente wird von den Anwendungen, dem Betriebssystem sowie der Netzwerkhardware, für die Übertragung oder die Verwaltung des Empfanges eines Datenpaketes beansprucht.

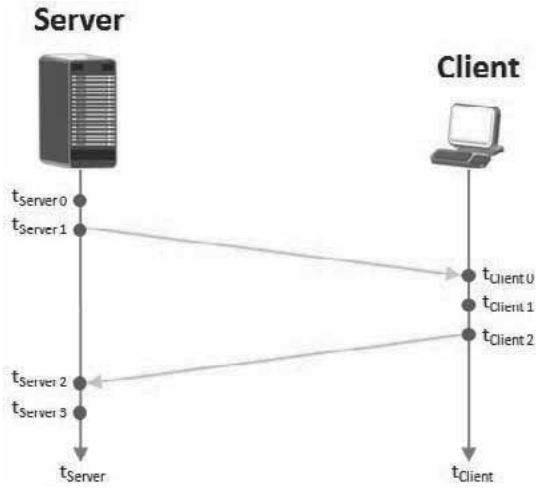


Abbildung 1: *Verzögerung auf einem Netzwerkpfad*

2.1.1 One Way Delay (OWD)

Das One Way Delay (deutsch: Einweg Verzögerung) entspricht der Verzögerung einer unidirektionalen Datenübertragung auf einem festgelegten Netzwerkpfad. Dabei wird die Zeitspanne zwischen Senden des ersten Bits eines Datenpaketes des Senders und dem Empfang des letzten Bits bei dem Empfänger definiert (Dreßler 2003). Diese Metrik ermöglicht somit eine komponentenübergreifende Analyse. Für die Ermittlung der Einweg Verzögerung sind im RFC 2679 folgende Parameter relevant:

- Bezugszeitpunkt
- Transportprotokoll
- Port Nummer
- Paketlänge
- DSCP Markierung (Differentiated Service Codepoint) RFC2475

Können Auffälligkeiten festgestellt werden oder wird eine Qualitätsverbesserung angestrebt, können einzelne Komponenten weitergehend analysiert werden. Dies erfolgt im Folgenden exemplarisch anhand eines Packet-Switch.

2.1.2 Packet-Switch

Packet-Switches (Switch, Bridge oder Router) arbeiten nach der sogenannten Store-and-Forward Übertragung. Die Store-and-Forward Übertragung arbeitet nach dem Prinzip, das zunächst das gesamte Datenpaket einer Datenübertragung empfangen werden muss, bevor es weiter zum nächsten Knoten des Netzwerkes gesendet wird (s. Abb. 2). Das Prinzip der Store-and-Forward Übertragung führt somit zu einer Verzögerung auf dem Übertragungskanal (Kurose und Ross 2008).

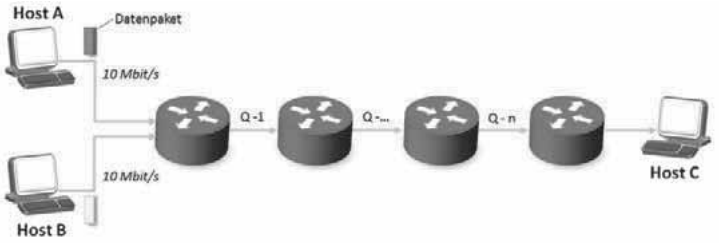


Abbildung 2: *Store and Forward Verfahren*

Ein Packet-Switch besitzt zudem sogenannte Ausgangspuffer, an welcher Stelle die Datenpakete gespeichert werden, die über eine Leitung versendet werden sollen, worüber allerdings zu diesem Zeitpunkt noch die Übertragung eines anderen Datenpaketes stattfindet. Das Prinzip der Ausgangspuffer, führt somit zu einer weiteren Verzögerung, der sogenannten Warteschlangenverzögerung (engl. queuing delay).

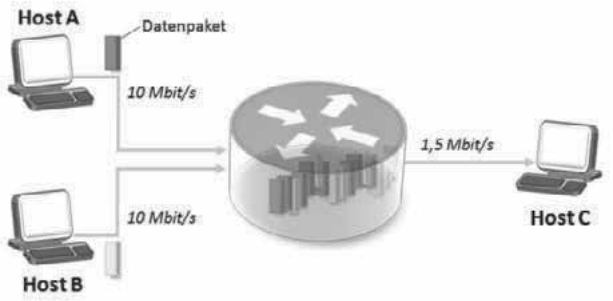


Abbildung 3: *Bottleneck*

Außerdem kann es bei eintreffenden Datenpaketen zu einem Datenpaketverlust führen, wenn bereits das maximale Speichervolumen des Ausgangspuffers erreicht ist. Die Warteschlangenverzögerung kann nicht ohne weiteres berechnet werden, da sie von der aktuellen Belastung des Netzwerkes abhängt und mit ihr variiert.

Übersteigt die Ankunftsrate eingehender Datenpakete, die Anzahl der Datenpakete die versendet werden können, stauen sich die Datenpakete an, bis der Ausgangspuffer vollständig gefüllt ist und es schließlich zum Datenverlust kommt (Kurose und Ross 2008). Wie bereits erwähnt hängt die Warteschlangenverzögerung

von der aktuellen Belastung des Netzwerkes ab, somit führt nicht automatisch eine, wie in der Abbildung 3, aufgeführte Verengung der Datenübertragungsrate innerhalb eines Netzwerkes zu Paket-verlusten. Jedoch wird durch eine derartige Konzeption des Netzwerkes, der Verlust von Datenpaketen bei der Datenübertragung gefördert. Daneben existieren noch die in der Abbildung 4 aufgeführten weiteren Verzögerungsarten.

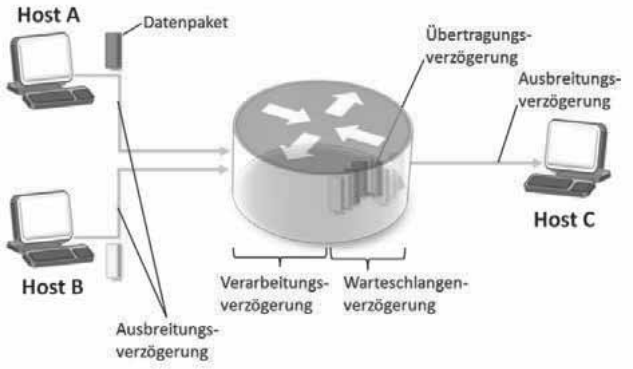


Abbildung 4: *Verzögerungsarten*

2.2 Verkehrswert

Der Verkehrswert ist ein Instrument zum Einschätzen der Warteschlangenverzögerung an Knoten. Dadurch können Erkenntnisse über die Auslastung von Knoten in einem Netzwerk gewonnen werden. Die Berechnung des Verkehrswertes erfolgt unter der Annahme eines unbegrenzten Ausgangspuffers, dabei wird die durchschnittliche Rate eingehender Pakete im Verhältnis zur Übertragungs-geschwindigkeit gesetzt. Die Berechnung des Verkehrswerts gestattet nun Aussagen über das Warteschlangenverhalten zu treffen. Somit wächst die Warteschlange, unter der Annahme eines unbegrenzten Ausgangspuffer, bei einem Verkehrswert > 1 gegen unendlich an (Kurose und Ross 2008).

Daraus folgt, dass die Konzeption des Netzwerkes stets so gestaltet sein sollte, das der Verkehrswert niemals > 1 (s. Abb. 5) und somit die Überlastung von Knoten vermieden werden.

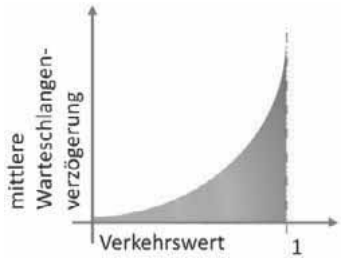


Abbildung 5: *Verkehrswert*

2.3 Interpretation von Ergebnissen

Ein Simulationslauf eines Netzwerkes liefert Messreihen mit einer großen Anzahl an Messergebnissen. Dabei können verschiedene Größen für eine Quantifizierung der Messergebnisse genutzt werden. Der Mittelwert drückt dabei die durchschnittliche Eigenschaft eines Netzwerkpfades aus. Die Extremwerte einer Messreihe, können dahingegen dafür genutzt werden die Grenzwerte eines Netzwerkpfades oder einer Komponente aufzudecken (Siemens 2005).

3 Abbildung der Komponenten in ein Schichtenmodell

Schichtenmodelle unterstützen dabei konzeptionell die Kommunikation der Systeme durch eine hierarchische Aufteilung der für eine Kommunikation benötigten Dienste. Dabei stellt jede Schicht seiner hierarchisch übergeordneten Dienste zur Verfügung (Kappes 2007).

Sowohl die Struktur des ISO/OSI sowie des TCP/IP Referenzmodell wird für den Einsatz zur Klassifizierung der Kommunikation in einem Netzwerk von Tanenbaum (2003) kritisiert. Dadurch entstand das Hybride Referenzmodell, welches sich sowohl an dem ISO/OSI- sowie an dem TCP/IP-Referenzmodell orientiert und die Vorteile ohne die jeweiligen Nachteile in einem Referenzmodell vereint.

Der Dienst einer Schicht wird durch die Kommunikation mit der hierarchisch gleichen Schicht auf dem anderen Knoten (innerhalb des Netzwerkes) realisiert. Die Regeln einer Kommunikation einer Schicht, werden durch das der Schicht zugehörige Protokoll festgelegt. Das Protokoll legt dabei den Ablauf der Kommunikation fest. Dabei übertragen die einzelnen Schichten nicht getrennt voneinander sondern über die hierarchisch darunterliegenden Schichten zusammen Daten. Dafür besitzen die einzelnen Schichten definierte Schnittstellen, wodurch die für ein heterogenes Netzwerk erforderliche Flexibilität erreicht (Tanenbaum 2003).

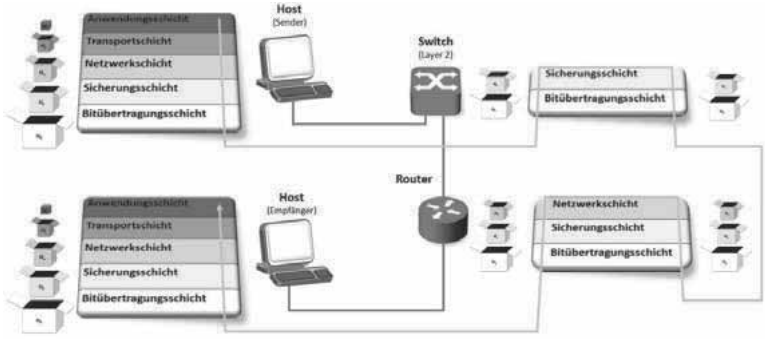


Abbildung 6: *Kommunikationsablauf*

4 Simulationsmodell

Für die Simulation, wird die diskrete ereignisgesteuerte Simulationsumgebung OMNeT++ (www.omnetpp.org) eingesetzt. Bei OMNeT++ handelt es sich in erster Hinsicht, um eine erweiterbare, modulare und Komponenten-basierte C++

Simulationsbibliothek sowie ein Simulationsframework, welches dazu dient, Netzwerksimulatoren zu entwickeln (OMNeT++ 2013a). Zusätzlich wird für die Abbildung und Simulation der Netzwerkkommunikation das INET Framework (Open Source Framework zur Simulation der Kommunikation innerhalb von Computernetzwerken (INET 2013)), welches bereits viele der in einem Computernetzwerk genutzten und für die Simulation benötigten Komponenten und Protokolle implementiert hat, verwendet.

Simulationsmodelle in OMNeT++ bestehen aus Modulen, über welche die Kommunikation durch den Austausch von Nachrichten (messages) erfolgt. Diese Module können beliebig tief hierarchisch untergegliedert werden (siehe Abbildung 7) und ermöglichen so eine hohe Detailtiefe bei der Abbildung der IT Service Komponenten (OMNeT++ 2013b).

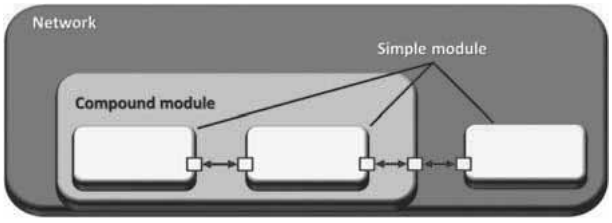


Abbildung 7: *Modulhierarchie*

Im Folgenden findet beispielhaft die Beschreibung eines Host Compound module statt. Dabei kann aus Gründen der Komplexität nicht auf jedes einzelne Compound module bis hin zum letzten Simple Modul eingegangen werden.

4.1 Die StandardHost Komponente

Bei der StandardHost Komponente handelt es sich um ein Compound module für die Modellierung eines IPv4 Host der bereits über diverse Protokolle verschiedener Schichten verfügt. Die folgende Abbildung 8 zeigt die Architektur der StandardHost Komponente im Detail. Dabei bedarf es im Rahmen des Projektes allerdings aus Gründen der Usability einer weiteren Anpassung bzw. Übertragung des Hybriden Referenzmodells auf die angeführte Standardhost Architektur.

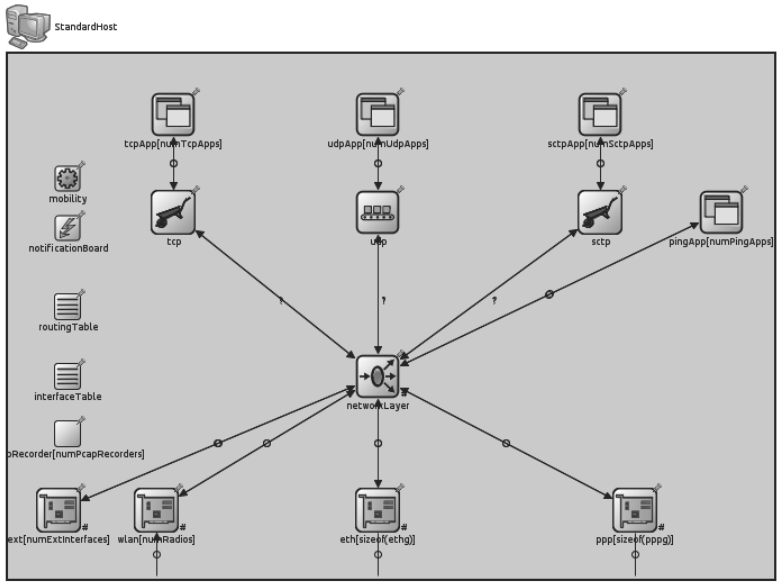


Abbildung 8: *StandardHost Compound module*

Die obersten drei Komponenten bilden die Anwendungen der Anwendungsschicht, welche TCP (Transmission Control Protocol), UDP (User Datagram Protocol) und/oder SCTP (Stream Control Transmission Protocol) Daten erhalten und/oder erzeugen. Dabei handelt es sich wiederum um Compound module. Beispielhaft kann in dem Modell eine TCP Anwendung erzeugt werden, welche ein TCP Datenaufkommen generiert. Die Anwendungen erzeugen dazu Objekte, welche die Daten repräsentieren. Dabei sind bereits verschiedene Ausprägungen von TCP Anwendungen, welche eine spezifische Charakteristik der Anwendung oder des Datenaufkommens ermöglichen, im INET Framework implementiert.

Das TCP Protokoll ist in der Transportschicht implementiert. Ein TCP Modul kann an n TCP Anwendungen angeschlossen sein und zudem m Verbindungen pro Anwendung besitzen. Zudem wurden im entwickelten TCP Modul des INET Framework bereits einige RFCs implementiert. Die erste Standardisierung erfolgte im RFC 793, welche die Kernfunktionalität des TCP Protokolls spezifiziert. In den weiteren RFCs erfolgten dahingegen Modifikationen und Erweiterungen an dem TCP Standard.

4.2 Abbildung der IT-Service Infrastruktur

Für die Abbildung der IT-Service Infrastruktur, werden die in Kapitel 2 identifizierten Parameter sowie die benötigten Informationen über die Kommunikationsstruktur (s. Kap. 3) aus einem CMDB-System über eine Schnittstelle importiert. Dazu wurde die Schnittstelle nach Kruse (2012) erweitert, um nicht identifizierte oder zusätzliche Parameter aus dem CMDB-System, welche jedoch für eine Metrik oder für eine realitätsnahe Abbildung in Form eines Schichtenmodells benötigt werden, zu konfigurieren. Die folgende Abbildung 9 stellt beispielhaft die Konfiguration der Parameter, eines aus dem CMDB-System

importierten Clients, der auf der Anwendungsschicht basierenden TCP Session für eine Simulation dar.

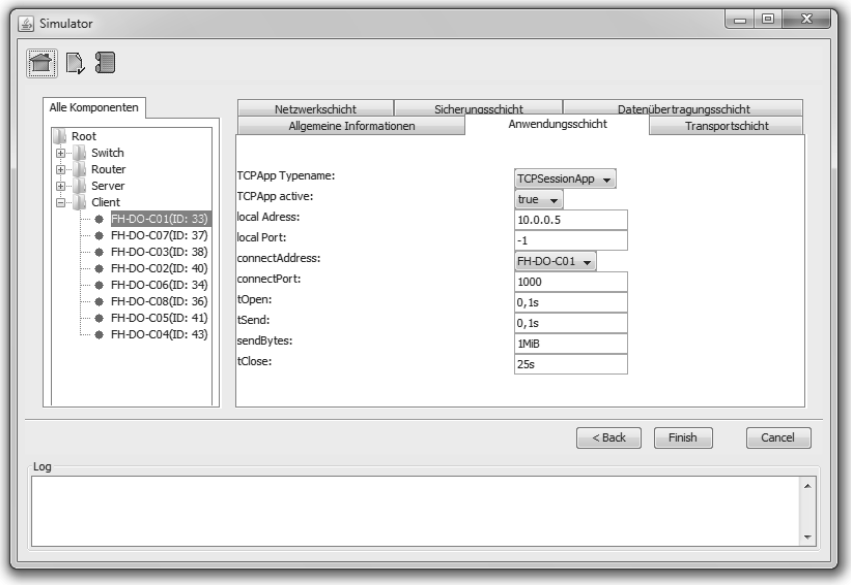


Abbildung 9: *Konfiguration eines Clients in der Schnittstelle*

4.3 Abbildung der IT Services

Die angestrebte Detailtiefe der IT-Infrastruktur wird dabei durch die Abbildung einzelner IT-Service Komponenten, welche sich auf die Software, Hardware oder Infrastruktur beziehen (Bartsch 2010), erzeugt. Bei der Abbildung der IT-Services in der Simulationsumgebung, erfolgt zunächst die IT-Service Betrachtung der Bereitstellung der Infrastruktur, darauf aufbauend ist eine Betrachtung der Bereitstellung von Software bzw. der Anwendungen und den darauf aufsetzenden Geschäftsprozessen denkbar. Dabei wird die Bereitstellung von Software auf die Ebene der Anwendungsschicht aufgesetzt. Die Bereitstellung der Infrastruktur erfolgt hingegen durch die Abbildung auf die identifizierten Schichten des Referenzmodells. Die folgende Abbildung 10 stellt dies beispielhaft dar.

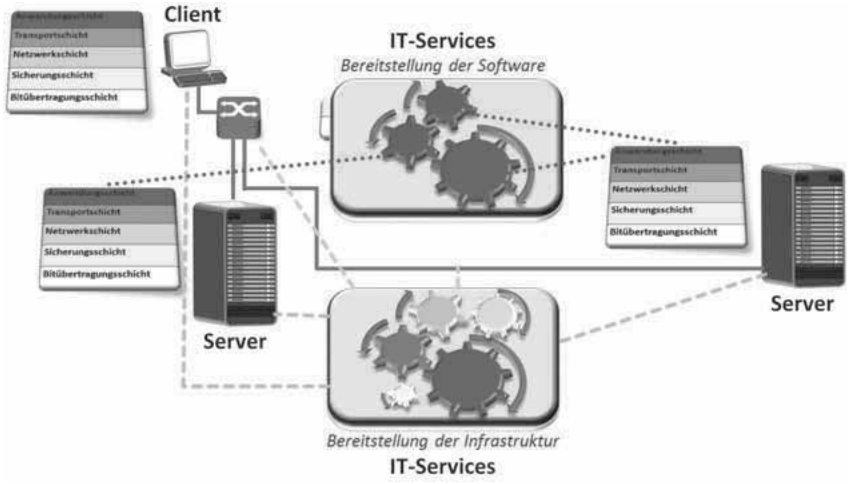


Abbildung 10: *Abbildung der IT-Services in der Simulation*

5 Zusammenfassung

Die Simulation von IT-Services auf Grundlage der IT-Infrastruktur ermöglicht eine neue Sichtweise. Durch die Abbildung von Veränderungen (Changes) in einem Computernetzwerk, innerhalb einer Simulationsumgebung, resultiert schließlich ein Ansatzpunkt der es zum einen ermöglicht, etwaige Anpassungen durch realitätsnahe Simulationsexperimente mit einem Gesamtüberblick über alle Komponenten zu analysieren, planen und kontrolliert durchführen zu können. Zum anderen können durch die Analyse, Bestimmung und Optimierung der Dienstgüte über Metriken aus dem Bereich der Netzwerkplanung/-optimierung, Schwachstellen oder Engpässe identifiziert werden, um die Qualität von hierarchisch darauf aufsetzenden IT-Services sicherzustellen. Darüber hinaus lassen sich quantitative Aussagen über die Eigenschaften der von den IT-Services genutzten IT Infrastruktur treffen. Dies kann dem Anwender eine in diesem Umfeld neuartige Repräsentation der Daten, hinsichtlich der Qualität, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Netzwerkes, welche in der Literatur in diesem Umfeld auch als Quality of Service bezeichnet werden, ermöglichen. Durch die Anbindung an eine CMDB und der Migration der Informationen in eine Simulationsumgebung wird zudem der Wirtschaftlichkeit sowie der Realitätsnähe nachgetragen.

Die Erweiterung der Schnittstelle nach Kruse (2012), befindet sich derzeit in der Entwicklung. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projektes bereits weitere Simulationsarten für die Analyse, auf Grundlage der in einem CMDB-System hinterlegten Informationen, identifiziert.

Literatur

Bartsch C., Modellierung und Simulation von IT-Dienstleistungsprozessen, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2010

Dreßler, F.: Monitoring of Networks for Time-Synchronous Communication, Dissertation, Arbeitsberichte des Instituts für Informatik Band 36, Nummer 4, Mai 2003

INET Framework for OMNeT++, Manual, URL: http://inet.omnetpp.org/doc/INET/inet-manual-draft.pdf, 2011, Abruf 21. März 2013

Siemens, E.: Verteiltes Messen der Dienstgüte und Netzwerk-Performance in IP-Netzen, Dissertation, Universität Hannover, August 2005

Kappes, M.: Netzwerk- und Datensicherheit – Eine praktische Einführung 1. Auflage 2007

Kruse, T.: Entwicklung einer Schnittstelle für die Interaktion zwischen einer CMDB und einem Simulator. Masterarbeit, Fachhochschule Dortmund 2012. (*Zur Nutzung überlassen von Thorsten Kruse*)

Kurose, J. F., Ross, W. K.: Computernetzwerke – Der Top-Down-Ansatz, 5. Akt. Auflage, 2008

OMNeT++: URL: http://www.omnetpp.org/ Abruf März 2013a

OMNeT++: User Manual Version 4.3. URL: http://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/Manual.pdf, Abruf 24. Mai 2013b

Tanenbaum, A. S.: Computernetzwerke 4. Überarbeitete Auflage Pearson Studium, Juli 2003

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Konzeptionelle Entwicklung einer Business Simulation für COBIT

Conceptual development of a Business Simulation for COBIT

Martin Fritsch, Sascha Müller-Feuerstein, HAW Ansbach, Ansbach (Germany), martin.fritsch@hs-ansbach.de, sascha.mueller@hs-ansbach.de

Rainer Groß, TH Nürnberg, Nürnberg (Germany), rainer.gross@ohm-hochschule.de

Abstract: This paper describes the conceptual development and prototypical implementation of a business simulation for the IT governance framework COBIT. In the first part the concept of serious games will be explained and the benefits and challenges of a simulation developed this way will be shown. The second part illustrates IT governance and the structures of COBIT. In the third part the contents for the COBIT simulation are selected and transferred into an optimised simulation model. The paper concludes with an overview of the conceptual development process of the business simulation and the technical implementation of an early staged prototype.

1 Einsatz von Simulationen in Produktion und Logistik

Die Implementierung geeigneter Strategien zur Umsetzung von *IT-Governance* ist für viele Unternehmen unverzichtbar. Die Relevanz des IT-Governance-Rahmenwerks *Control Objectives for Information and Related Technology* (COBIT) steigt entsprechend stetig an, um die Anforderungen der unterschiedlichen Unternehmensbereiche optimal durch effiziente IT-Prozesse zu unterstützen, siehe *Abschnitt 3*. Je weiter die Implementierung wichtiger IT-Prozesse in den verschiedenen Unternehmensbereichen voranschreitet, desto komplexer ist deren Verwaltung. Vor allem die Steuerung und Kontrolle der zugrundeliegenden Systemlandschaft und deren Zusammenspiel mit den Fachbereichen eines Unternehmens führen zu neuen Herausforderungen, die durch den Einsatz von COBIT gelöst werden müssen (ITGI 2005).

An diesem Punkt setzt die Idee einer COBIT-Simulation an. Business Simulationen sollen komplexe Prozesse, die im Rahmen des Unternehmensalltags auftreten, in eine geschützte (digitale) Umgebung verlagern und nach Möglichkeit vereinfachen, damit wichtige Zusammenhänge in einer sicheren und durch Motivation geförderten virtuellen Welt erfahren werden können (Hugger 2010). Hierfür bedarf es der Beachtung einiger Grundsätze, welche sowohl didaktische als auch inhaltliche

Problemstellungen betreffen (Ganguin 2010; Schwan 2006). Auf den folgenden Seiten werden diese erläutert und in ein Simulationskonzept für den Einsatz des COBIT-Frameworks zur Umsetzung von IT-Governance in Unternehmen überführt.

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Business Simulation, die es ermöglicht wichtige Inhalte von COBIT didaktisch und fachlich fundiert an die Simulationsteilnehmer zu vermitteln.

2 Grundlagen einer Business Simulation

Wird eine Business Simulation in Form eines digitalen Simulations-Spiels realisiert, kann sie dem Bereich des *Digital Game Based Learning* (DGBL) oder der *Serious Games* zugeordnet werden. Ganguin (2010) beschreibt damit ein Konzept „[…] Computerspiele für pädagogische Zwecke bzw. Lern- und Bildungsprozesse nutzbar zu machen […]".

Der Einsatz von Serious Games im Bereich komplexer Zusammenhänge birgt viele Vorteile für die Wissensvermittlung (Schwan 2006; Holzinger 2001):

- *Fantasie:* Lernspiele spielen in einer nicht realen Welt, die es den Spielern ermöglicht, unterschiedliche Rollen anzunehmen.
- *Regeln und Ziele:* Eine Simulation verfolgt klar definierte Regeln und Lernziele.
- *Sensorische Reize:* Visuelle und auditive Reize erhöhen die Interaktivität zwischen Simulation und Spieler und verbessern das Verständnis der Inhalte.
- *Herausforderung und Risiko:* Ein stetig anpassbarer Schwierigkeitsgrad ermöglicht eine optimale Ausrichtung auf das Können der Teilnehmer.
- *Neugier und Engagement:* Serious Games nutzen die natürliche Neugierde eines Menschen und fördern die Motivation beim Erlernen der Zusammenhänge.
- *Kontrolle und Sicherheit:* Simulationen ermöglichen es, gewisse Rollen in einer virtuellen Welt einzunehmen ohne die realen Konsequenzen einer Fehlhandlung.

Schwan (2006) äußert sich umfassend zu den Vorteilen von Serious Games, geht jedoch nicht auf die Herausforderungen der Umsetzung des Konzepts auf Basis einer Simulation ein. In normalen COBIT-Schulungen stehen zumeist die wichtigen Inhalte des Frameworks und deren Umsetzung im Fokus. Eine Business Simulation erfordert dagegen ein Umdenken von den reinen Inhalten hin zur Art der Wissensvermittlung, ohne die Inhalte dabei zu verfälschen (Hugger 2010). Folglich muss eine so konzipierte Simulation während ihrer Umsetzung stetig daraufhin überprüft werden, ob die darin abzubildenden Lerninhalte in einer optimal ausgerichteten Art zur Wissensvermittlung implementiert werden können.

3 IT-Governance auf Basis von COBIT

Der internationale Verband für IT-Prüfer *Information Systems Audit and Control Association* (ISACA) veröffentlichte 1996 die erste Ausgabe von COBIT - einem Rahmenwerk zur Unterstützung von IT Revisoren und IT-Governance Beauftragten. Seit 2012 gibt es die COBIT Version 5, die einen noch stärkeren Fokus auf die Unterstützung der Unternehmensziele durch die Unternehmens IT legt. COBIT 5 basiert auf den fünf grundlegenden Prinzipien (ISACA 2012):

- Erfüllung der Anforderungen der Anspruchsgruppen
- Abdeckung des gesamten Unternehmens

- Anwendung eines einheitlichen, integrierten Rahmenwerks
- Ermöglichung eines ganzheitlichen Ansatzes
- Unterscheidung zwischen Governance und Management.

Durch das Prinzip der Trennung zwischen Governance und Management wird explizit zwischen Vorgaben und Umsetzung der Vorgaben unterschieden. Die Governance stellt dabei sicher, dass die Anforderungen der Stakeholder aufgenommen, bewertet und in sinnvolle Unternehmensziele umgesetzt werden. Management plant, erstellt, betreibt und überwacht Aktivitäten, um die Vorgaben der Governance zu erreichen. Diese Unterscheidung spiegelt sich auch in dem Prozessreferenzmodell von COBIT, das aus den beiden Domänen *Governance* und *Management* besteht. Erstere enthält fünf Prozesse, die nach den Prinzipien *Evaluieren*, *Richtung vorgeben* und *Überwachen* aufgebaut sind. Die Domäne Management unterteilt sich in vier Unterdomänen die entsprechend dem COBIT-Verständnis von Management *Planen*, *Aufbauen*, *Ausführen* und *Überwachen* lauten. Insgesamt enthält die Domäne 32 Prozesse (ISACA 2012).

Alle Prozesse enthalten ein übergeordnetes Control Objective sowie mehrere detaillierte *Control Objectives*. Dabei sind Objectives Aussagen über das gewünschte Ergebnis des jeweiligen Prozesses. Gemessen werden diese Objectives durch entsprechende *Key Performance Indicators* (KPIs) und *Key Goal Indicators* (KGIs), die ebenso für jeden einzelnen Prozess definiert sind.

4 Verwandte Arbeiten

Im Bereich der COBIT-Simulationen gibt es bisher nur eine Lösung, welche nachfolgend beschrieben und bewertet wird. Da diese jedoch keine Simulation im eigentlichen Sinne darstellt, wurde auch die ITIL-Simulation Fort Fantastic der Firma *Business Games and Simulations* (BuGaSi) *Labs* (BuGaSi 2012) näher untersucht, um daraus Anregungen für die Umsetzung der Business Simulation, sowohl in fachlicher als auch didaktischer Sicht, zu generieren.

4.1 The COBIT Games – Eine COBIT-Simulation

The COBIT Games ist ein Lernspiel in Form eines Brettspiels, das direkt von der ISACA und dem *IT Governance Institute* (ITGI) – den Erstellern des COBIT-Frameworks – entwickelt wurde (IT Preneurs 2010).

In dieser Business Simulation sollen die Spieler die fiktive Stadt Concordia auf die Ausrichtung der olympischen Spiele vorbereiten. Die Stadt besteht dabei aus sechs Stadtteilen, die die Unternehmensbereiche abbilden und durch die Durchführung spezieller Maßnahmen auf die bevorstehende Veranstaltung vorzubereiten sind (vgl. Abbildung 1).

Die Entwickler der Simulation entschieden sich, die COBIT-Inhalte vollständig abzubilden, diese jedoch in eine leicht abstrahierte Spielwelt zu platzieren und mit einer abstrakten Idee (Vorbereitung einer Stadt auf Olympia) zu überlagern. Das Spiel wird rundenbasiert, unterstützt von haptischen Gegenständen (Spielkarten und -steinen) im Rahmen von Schulungsveranstaltungen durchgeführt.

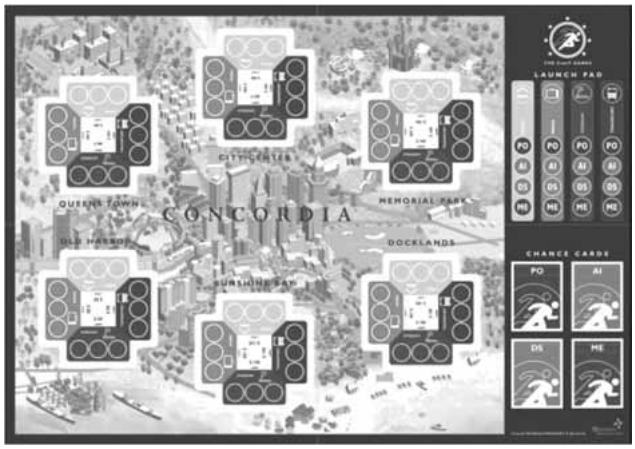


Abbildung 1: *The COBIT-Games – Ein Brettspiel (Hardy 2006)*

Vor allem der Ansatz der Abstraktion und die rundenbasierte Durchführung des Brettspiels können als fachlich relevant für die zu entwickelnde Business Simulation kategorisiert werden. Die fehlende Fokussierung auf spezielle Teilbereiche von COBIT, die geringe Abstraktionstiefe, sowie die limitierte Einsetzbarkeit als Brettspiel bieten genug Potential für die Entwicklung der computergestützten Business Simulation.

4.2 Fort Fantastic – Eine ITIL-Simulation

Fort Fantastic (BuGaSi 2012) ist eine teilweise rechnergestützte, aber auch mit haptischen Elementen versehene Business Simulation, die komplexe Sachverhalte, wie insb. das IT-Management mit ITIL oder Führungsmanagement spielerisch vermittelt. Als Szenario wurde von der Firma BuGaSi Labs das Management eines Freizeitparks gewählt. Komplexe IT-Prozesse können so auch fachfremden Teilnehmerkreisen, wie z.B. Mitarbeitern von Fachabteilungen, ohne langwierige Einarbeitung innerhalb einiger Stunden vermittelt werden. Der besondere Lerneffekt ergibt sich sowohl aus dem Simulationsmodell, das insb. die komplexen Abläufe des Parkmanagements nur sehr gezielt sichtbar macht, als auch aus dem Simulationskonzept, das durch die intensive Interaktion in der Gruppe und die Echtzeitinteraktion mit der Simulationssoftware das problemorientierte Lernen in der Vordergrund rückt.

Wichtige Aspekte des Lernkonzepts von Fort Fantastic sind die notwendige Gruppengröße (mind. 5 Personen pro Gruppe), der Wettbewerb der Gruppen untereinander und die Mischung von haptischen Elementen (Spielkarten, Handbücher) mit einer computerbasierten Simulation. Daraus ergibt sich, dass zur Durchführung einer Fort Fantastic Simulationsrunde diverse organisatorische Rahmenbedingungen, wie z.B. geeignete Räumlichkeiten oder ein gemeinsamer Termin für eine erhebliche Menge an Mitarbeitern, erfüllt sein müssen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Fort Fantastic Simulation ein gelungenes Beispiel für eine moderne Business Simulation ist und gerade die konzeptionellen Stärken bei der Entwicklung von Serious Games berücksichtigt werden sollten.

5 Überführung der Inhalte in ein Simulationsmodell

Wichtig für den Erfolg einer Business Simulation ist die lernzielorientierte Auswahl der abzubildenden Inhalte. Das COBIT-Framework ist in seinem Aufbau sehr umfangreich (ITGI 2007a). Es muss daher entschieden werden, auf Basis welcher Inhalte von COBIT der Lernerfolg maximiert werden kann.

5.1 Auswahl der Spielinhalte

Durch die Reduktion auf die elementaren Bestandteile ergeben sich signifikante Vorteile für die Simulationserstellung:

- *Zeitreduktion:* Das umfangreiche Framework wird in kleinere und besser in die Simulation zu integrierende Teilbereiche zerlegt.
- *Beachtung der Grundlagen von Serious Games:* Der verringerte Inhaltsumfang lässt sich besser an die Vorgaben eines Serious Games anpassen.
- *Höhere Qualität:* Durch die Umsetzung der von Schwan (2006) genannten Vorteile, kann eine bessere Nutzbarkeit und Nachhaltigkeit erwartet werden.

Das COBIT-Framework wird in jedem Prozess immer auf Control Objective-Ebene herunter gebrochen, siehe *Abschnitt 3*. Für das Herausfiltern der relevanten Simulationsinhalte wurde deshalb auf einen kombinierten Top-Down-/Bottom-Up-Ansatz zurückgegriffen (ITGI 2007b), um die erforderlichen Abhängigkeiten trotz der angestrebten Einschränkungen erhalten zu können.

COBIT-Prozesse mit Control Objectives	Relevanz	Kommentar
PO1: Definiere einen strategischen IT-Plan		
PO1.1: Management des Wertbeitrags der IT	o	Wertbeitragsberechnung der IT ist hoch komplex
PO1.2: Ausrichtung Kerngeschäft und IT	++	Zentraler Inhalt für moderne IT -> Wichtig für Simulation
PO1.3: Bewertung der gegenwärtigen Performance	++	Relevant zur Bestimmung der Ausrichtung der IT
PO1.4: Strategischer IT-Plan	+	Wichtig, aber Simulation mehr taktisch ausgerichtet
PO1.5: Taktischer IT-Plan	++	Mit Simulationswelt abstrahiert umsetzbar
PO1.6: IT-Portfoliomanagement	++	Wichtig für Priorisierung und Ausrichtung der IT
PO2: Definiere die Informationsarchitektur		
PO2.1: Informationsarchitekturmodell	-	Umsetzung eines solchen Modells nicht sinnvoll
PO2.2: Unternehmensweites Data Dictionary	-	Durch Abstraktion der IT und der Daten nicht sinnvoll
PO2.3: Datenklassifikationsschema	-	In der Simulation kein direkter Umgang mit Daten
PO2.4: Handhabung der Integrität	-	Datenintegrität in Simulation nicht wichtig

Abbildung 2: *Bewertung der Inhalte anhand der Control Objectives von COBIT*

Abbildung 2 zeigt einen Tabellenausschnitt, in dem die Control Objectives nach sehr hoher (++), hoher (+), mittlerer (o) und niedriger (-) Relevanz für die Business Simulation bewertet wurden. Für die Bewertung der Objectives wurde einerseits die Integration jedes Prozesses in das gesamte COBIT-Rahmenwerk betrachtet. Zum anderen wurden sämtliche Control Objectives hinsichtlich ihrer didaktischen und fachlichen Umsetzbarkeit in einer produktiv einsetzbaren Simulation hin untersucht. Die notwendigen Entscheidungsgrundlagen für den durchgeführten Auswahlprozess wurden ergänzender Literatur zur praktischen Umsetzung von IT-Governance innerhalb eines Unternehmens (ITGI 2007b) entnommen.

Insgesamt konnte hierdurch eine Reduktion der Inhalte auf 29 Control Objectives, untergliedert in zehn Prozesse, verteilt über die gesamte Management-Domäne von COBIT erreicht werden. Trotz der inhaltlichen Einschränkungen bleiben die Gesamtstruktur, alle Monitoring-Werkzeuge und damit die realitätsnahe Abbildbarkeit des Frameworks auf die Business Simulation vollständig erhalten.

5.2 Erstellung eines Simulationsmodells

Für die COBIT-Simulation wurde nach der Evaluation verschiedener Spielszenarien der Betrieb mehrerer Hotels einer renommierten Hotelkette als zugrundeliegendes Szenario ausgewählt. Die Spieler sollen als Gruppe die Rolle eines Bauunternehmers einnehmen, der die Wünsche des Hotelkettenbetreibers entsprechend umsetzen und unterstützen muss. Die Hotels repräsentieren hierbei die unterschiedlichen Bereiche eines fiktiven Unternehmens.

Der Bauunternehmer setzt sich während einer Simulationsrunde mit mehreren Herausforderungen, bspw. dem Bau neuer Attraktionen, der Aufrechterhaltung des laufenden Hotelbetriebs oder der Abstimmung seiner Mitarbeiter auseinander. Dabei werden die Spieler unter anderem mit den unterschiedlichen Fähigkeiten ihrer Angestellten, den benötigten Baumaschinen für die Umsetzung eines Bauvorhabens oder anderen teilweise unvorhersehbaren Zwischenfällen konfrontiert.

Überwacht werden soll die Leistung der Spielgruppen in regelmäßigen Abständen vom Betreiber der Hotelkette, dessen Rolle von der Simulationslogik übernommen wird. Eine solche Bewertung der erzielten Spielergebnisse motiviert die Spieler und fördert die Adaption der Spielinhalte (Ganguin 2010; Hugger 2010).

Angelehnt an die Struktur des COBIT-Frameworks ist es notwendig ein Simulationsszenario zu konstruieren, das alle in *Abschnitt 5.1* ausgewählten Inhalte abstrahiert in der Simulation abbildet. Um die Vollständigkeit sicherzustellen, wurde das Modell deshalb über die abzubildenden Inhalte gelegt und schrittweise optimiert.

6 Entwicklung des Simulationskonzepts

Aufbauend auf dem Simulationsmodell wurde ein Konzept für die Business Simulation entworfen. Wichtig ist dabei den Aufbau der Simulation festzulegen, die darin abzubildenden Rollen inkl. der damit verknüpften Verantwortlichkeiten zu spezifizieren und die Auswertung der erreichten Spielergebnisse auszuarbeiten.

6.1 Der Aufbau der COBIT-Simulation

Zentrales Element der Simulation ist die operative Durchführung von IT-Projekten. Wie in COBIT vorgesehen, ist vorab eine vorbereitende Planung zu erstellen. Zur Evaluation der Spielergebnisse wird eine Auswertung wichtiger Kennzahlen benötigt, weshalb sich eine Dreiteilung der Spielrunde anbietet:

- *1. Planungsphase:* Die Spielgruppe legt zu Beginn einer neuen Spielrunde fest, welche Pläne sie in der Durchführungsphase umsetzen will. Hierbei müssen Budget-, Ressourcen- und Kapazitätsvorgaben beachtet werden.
- *2. Operative Phase:* In dieser Phase der Simulation müssen die zuvor erarbeiteten Pläne umgesetzt werden. Zwischenfälle und kurzfristige Änderungswünsche erschweren die geplante Durchführung.

- *3. Auswertephase:* Zum Abschluss einer Spielrunde werden alle Handlungen auf Basis vordefinierter Kennzahlen ausgewertet und den Spielern präsentiert.

Abbildung 3 zeigt, wie die unterschiedlichen Spielinhalte der drei Phasen ineinander greifen und in gegenseitiger Abhängigkeit zueinander stehen. Zudem wird das Matching zwischen den abstrahierten Teilen des Lernspiels und den korrespondierenden Inhalten des COBIT-Frameworks illustriert.

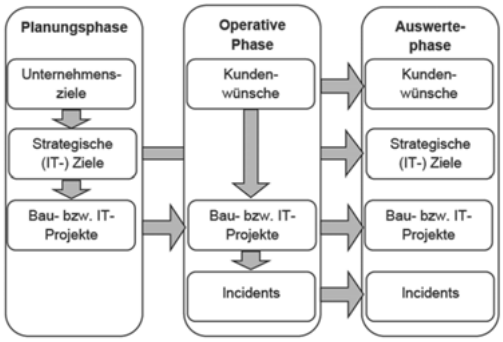


Abbildung 3: *Aufbau einer Spielrunde der COBIT-Simulation*

6.2 Rollen und Verantwortlichkeiten in der Simulation

In einer ersten Version der Business Simulation sollen nur die wichtigsten Rollen abgebildet werden. Deren Zuordnung zu COBIT (ITGI 2007a), ihre jeweiligen Aufgaben während eines Simulationsdurchlaufs und die korrespondierenden Rollen im Lernspiel sind Abbildung 4 zu entnehmen.

Rolle in COBIT	Vorgabe/Aufgabe	Rolle in Simulation	Person
CEO	Unternehmensziele, Budgetvorgaben	Hotelketten-besitzer	Benjamin Bauer
CIO	Strategische IT-Ziele, IT-Projekte	Bauunter-nehmer	Spielendes Team
Controlling	Überwachung des Budgets, Strategie	Interne Überwachung	Stefan Schnüffler
External Consulting	Unterstützung des Spielers	Externe Unterstützung	Albert Allwissend
Risk & Security	Überwachung des Risikos	Sicherheits-beauftragte	Sabine Sicher

Abbildung 4: *Rollen in der COBIT-Simulation*

In der aktuellen Implementierung werden alle virtuellen Rollen bis auf die des Bauunternehmers von der Simulationslogik übernommen. Eine spätere Abbildung auf reale Spieler ist angedacht.

6.3 Auswertung des Rundenergebnisses

Um eine COBIT-konforme Bewertung vornehmen zu können, wurden sowohl die Domäne *Monitor & Evaluate* als auch die Key Goal Indicators der in der Simulation abgebildeten Control Objectives von COBIT untersucht. Hierbei konnten vorerst vier KGIs als geeignet selektiert werden (ITGI 2005; ITGI 2007a), die mittels mehrerer Algorithmen die notwendige Grundlage für die Berechnung des Rundenergebnisses bilden. Eine detaillierte Zusammensetzung ist Abbildung 5 zu entnehmen.

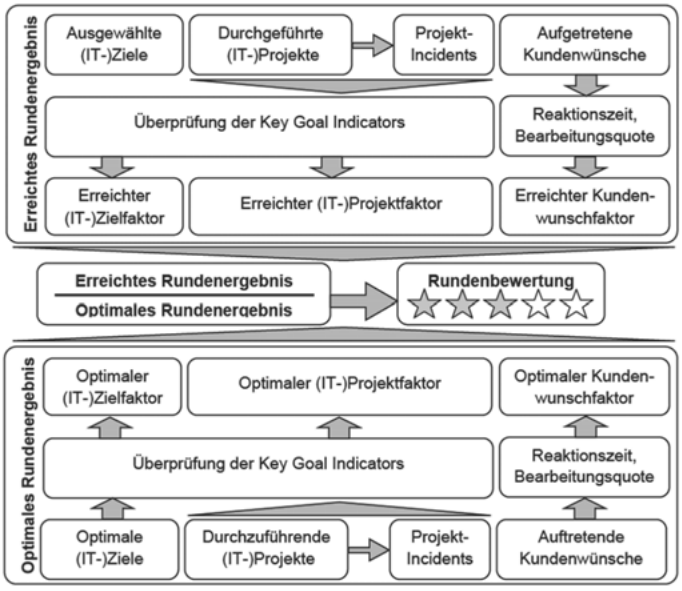


Abbildung 5: *Berechnung des Rundenergebnisses der COBIT-Simulation*

Für das Rundenergebnis werden aus allen abzuarbeitenden *Zielen*, *Projekten*, *Incidents* und geäußerten *Kundenwünschen* insgesamt drei Teilfaktoren gebildet. Diese untergliedern sich in *Ziel-*, *Projekt-* und *Kundenwunschfaktor*, für die jeweils ein optimaler Soll- und ein tatsächlicher Ist-Wert berechnet und in Relation zueinander gesetzt werden. Die Kennzahlen für den erreichten Ist-Wert basieren hierbei auf den durchgeführten Projekten, der Erreichung der geplanten Ziele und der aktuellen Bearbeitungsquote der Event-basiert aufgetretenen Incidents und Kundenwünsche während der operativen Phase des Simulationsdurchlaufs. Der optimale Soll-Wert wird hingegen anhand eines vorab vom Spielleiter festgelegten Ablaufplans, in dem alle wichtigen Vorkommnisse für die Simulationsrunde hinterlegt sind, berechnet.

Abschließend wird das erzielte Rundenergebnis jeder Spielgruppe mitgeteilt und mit den Kennzahlen der anderen Spielergruppen verglichen. Eine gemeinsame *Evaluation der Best-Practices* erfolgt anschließend vom Spiel- bzw. Schulungsleiter, wodurch die Adaption der vermittelten Lerninhalte für den späteren Unternehmenseinsatz erhöht werden soll.

7 Der Prototyp COmBI naTion

Die Entwicklung des Prototyps ist noch nicht abgeschlossen (Fritsch 2012), wird derzeit aber weiter voran getrieben, um das Spielkonzept abschließend evaluieren zu können. Bisher existiert eine erste Version der Spieloberfläche (vgl. Abbildung 6), die sich an der Struktur der ITIL-Simulation Fort Fantastic (siehe *Abschnitt 4.2*) orientiert. Alle Hotels wurden optisch auffällig gestaltet, um die während der Simulation stattfindenden Prozesse durch zusätzliche sensorische Anreize besser im Gedächtnis der Spieler verankern zu können (Schwan 2006).

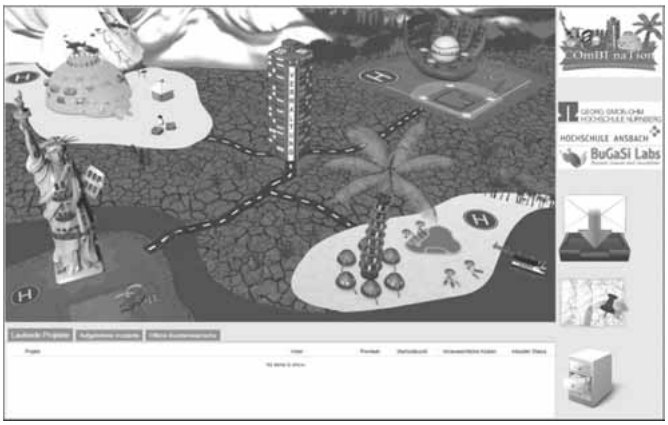


Abbildung 6: *User Interface der COBIT-Simulation*

Die verbleibenden Teile des *User Interfaces* (UI) wurden funktionell und intuitiv bedienbar gestaltet. Im unteren Bereich finden die Spieler in separaten Reitern laufende Projekte, aufgetretene Incidents bzw. angefallene Kundenwünsche, die es während der Spielrunde zu bearbeiten gilt. Auf der rechten Seite des UI wurden Icons zur Verwaltung der Abläufe für die operative Durchführung integriert.

Alle Bestandteile der Simulation liegen in digitaler Form vor und werden mittels eines verteilten Systems zur Verfügung gestellt. Die Spieler sind somit ortsunabhängig und eine Durchführung der Simulation mit örtlich getrennten Spielgruppen ist möglich. Realisiert wurde die Implementierung durch das Simulations-Framework *SUBWAY* (Centmayer 2012), welches in Kooperation mit BuGaSi Labs entworfen wurde. Für den Aufbau des UIs wurden das *Google Web Toolkit* (Smeets et al. 2008), *Smart GWT* (Jivan 2008) und *GWT Platform* (Beaudoin 2011) verwendet.

8 Zusammenfassung

Durch die stetig fortschreitende Integration moderner IT-Lösungen innerhalb der Unternehmen ist auch die erfolgreiche Umsetzung einer IT-Governance eine zentrale Herausforderung im Unternehmen. Das anhand der entwickelten Business Simulation vermittelte grundlegende Verständnis der COBIT-Prozesse bildet eine wichtige Basis für die Ausbildung eines gemeinsamen Verständnisses zwischen Fach- und IT-Abteilungen.

Das COmBI naTion-Projekt hat gezeigt, dass sich die Inhalte des COBIT-Rahmenwerks mit gewisser Selektion für die Umsetzung innerhalb einer Simulation eignen und auch didaktisch sinnvoll zu implementieren sind. Der Einsatz speziell entwickelter Business Simulationen bietet ein enormes Potential der Wissensvermittlung (Picot et al. 2008), weshalb dort weiter geforscht werden sollte.

Literatur

Beaudoin, P.: A complete model-view-presenter framework to simplify your next GWT project. [Online, 31.05.2013] http://code.google.com/p/gwt-platform 2011.

BuGaSi Labs: Fort Fantastic – Das Spiel. [Online, 31.05.2013] http://www.fortfantastic.com/index.php/de/die-simulation 2012.

Centmayer, M.: Subway – Konzeption und Entwicklung eines Client-Server Simulations-Frameworks für Educational und Business Games. Ansbach 2012.

Fritsch, M.: Serious Gaming – Konzeptionelle Entwicklung und prototypische Umsetzung eines Lernspiels zur Vermittlung von ausgewählten COBIT-Inhalten anhand eines lerntheoretischen Ansatzes. Nürnberg / Ansbach 2012.

Ganguin, S.: Computerspiele und lebenslanges Lernen – Eine Synthese von Gegensätzen. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften 2010.

Hardy, G.: ITGI to Release COBIT 4.1 and Associated Publications. COBIT Focus – The newsletter dedicated to the COBIT user community Volume 2 (2006).

Holzinger, A.: Basiswissen Multimedia. Band II: Lernen – Kognitive Grundlagen multimedialer Informationssysteme. Würzburg: Vogel 2001.

Hugger, K.: Digitale Lernwelten: Konzepte, Beispiele und Perspektiven. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften 2010.

Information Systems Audit and Control Association (ISACA): COBIT 5 – Rahmenwerk für Governance und Management der Unternehmens-IT – Deutsche Ausgabe. Rolling Meadows 2012.

IT Governance Institute (ITGI): COBIT 4.0 - Deutsche Ausgabe. Rolling Meadows 2005.

IT Governance Institute (ITGI) (2007a) COBIT 4.1. Rolling Meadows 2007.

IT Governance Institute (ITGI) (2007b) COBIT Control Practices – Guidance to achieve Control Objectives for successful IT Governance. 2nd Edition, Rolling Meadows 2007.

IT Preneurs: The COBIT Games – How is the Game played. [Online, 31.05.2013] http://www.cobitgames.com/how_to_play.php 2010.

Jivan, S.: Sanjiv Jivan's J2EE Blog – SmartGWT 1.0 Released! [Online, 31.05.2013] http://www.jroller.com/sjivan/entry/smartgwt_1_0_released 2008

Picot, A.; Zahedani, S.; Ziemer, A.: Spielend die Zukunft gewinnen – Wachstumsmarkt Elektronische Spiele. Heidelberg: Spring 2008.

Schwan, S.: Game Based Learning – Computerspiele in der Hochschullehre. e-teaching.org 2006.

Smeets, B.; Boness, U.; Bankras, R.: Beginning Google Web Toolkit – From Novice to Professional. Berkeley: Apress 2008.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Emulation als Werkzeug in der Entwicklung von Steuerungssoftware

Development of Control Software with the Aid of Emulation

Ruth Fleisch, Robert Schöch, Thorsten Prante, V-Research GmbH, Dornbirn (Austria), ruth.fleisch@v-research.at, robert.schoech@v-research.at, thorsten.prante@v-research.at

Robert Pflegerl, Schelling Anlagenbau GmbH, Schwarzach (Austria), robert.pflegerl@schelling.at

Abstract: This paper presents the deployment of emulation in the field of development of control software for the special case of cut-to-size plants featuring feedbacks in the material flow. In contrast to classical layouts of cut-to-size plants with linear material flow, panels can be allocated to the same saw via a feedback line as many times as it is required for their partitioning in the new plant layout. These circles in the material flow impose new challenges as they may cause deadlocks. In order to achieve the objective of operating a cut-to-size plant in a non-blocking way and at the same time with a high utilization of the saws, a deadlock-avoidance strategy is implemented into the software of the plant control layer. For its testing and fine tuning an emulation tool is used, which connects the plant control software with the virtual analogues of the control and the field layer.

1 Einführung

Plattenaufteilanlagen werden eingesetzt, um Platten aus Holzwerkstoffen mittels Sägen in die gewünschten Formate aufzuteilen, die fertigen Teile zu sortieren und zu stapeln. Diese Prozesse werden von verschiedenen Typen von Maschinen, wie zum Beispiel Längs- und Quersägen, Sortierwagen, Dreh- und Stapelgeräte oder Rollenbahnen, voll automatisiert durchgeführt. Abbildung 1 stellt die Bereiche dar, in die die Maschinen entsprechend ihren Funktionen gruppiert sind, und die von den aufzuteilenden Platten in der Reihenfolge Beschickung, Sägen, Sortierung und Stapelung durchlaufen werden.

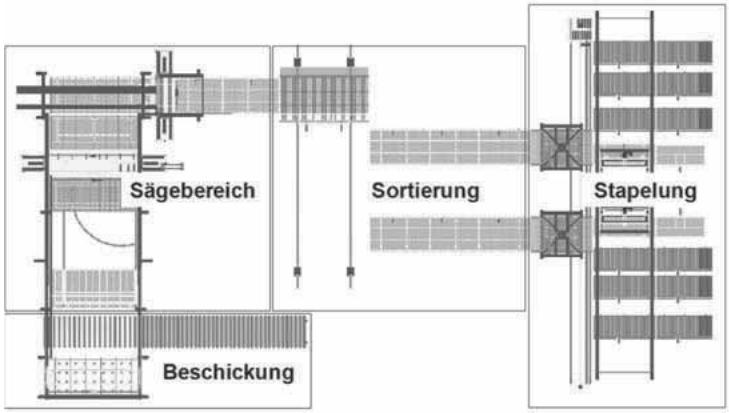


Abbildung 1: *Klassisches Layout einer Plattenaufteilanlage*

Der Einsatz von Plattenaufteilanlagen in der Auftragsfertigung bedingt die Produktion von immer kleineren Losen, was komplexere Schnittpläne der Platten zur Folge hat. Abbildung 2 stellt einen einfachen und einen etwas aufwändigeren Schnittplan gegenüber.

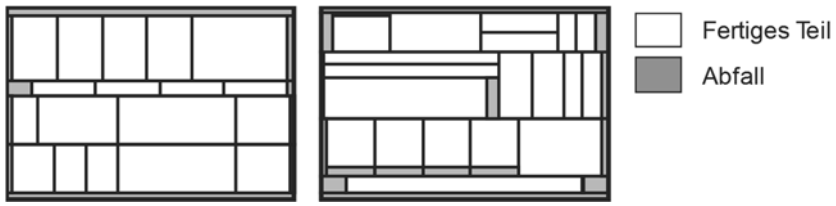


Abbildung 2: *Einfacher (links) und komplexerer Schnittplan einer Platte*

Die Platte, deren Schnittplan links in Abbildung 2 wiedergegeben ist, kann problemlos auf einer klassischen Plattenaufteilanlage bearbeitet werden: zuerst wird sie auf der Längssäge in Streifen geschnitten, die anschließend auf der Quersäge weiter aufgeteilt werden. Es ist jedoch nicht möglich, Platten mit komplexeren Schnittplänen wie der auf der rechten Seite auf einer herkömmlichen Anlage effizient zu produzieren. Um dieses Problem zu lösen, ist das Anlagenlayout dahingehend geändert worden, dass der Materialfluss nun Rückführungen aufweist. Das bedeutet im Kontext von Plattenaufteilanlagen, dass eine Platte beziehungsweise Teile davon, die bereits auf einer Säge geschnitten worden sind, über eine Rückführstrecke erneut derselben Säge für ihre weitere Aufteilung zugeordnet werden können – und das beliebig oft. Der Materialfluss der neuen Plattenaufteilanlage weicht somit wesentlich von der bisherigen linearen Grundkonzeption ab und bringt neue Herausforderungen mit sich, da Rückführungen Deadlocks verursachen können. Ein Deadlock ist als ein Zustand der Plattenaufteilanlage definiert, in dem die Anlage oder Teile davon auf unbestimmte Zeit blockiert ist und seine anstehenden Aufgaben nicht beenden kann (Fanti und Zhou 2004). Um das Auftreten eines Deadlocks zu verhindern, wird ein Algorithmus entwickelt und in die Software implementiert, die die Plattenaufteilanlage steuert.

Das Verfahren trifft die Entscheidungen, die den deadlockfreien Betrieb der Anlage bewirken sollen, in Echtzeit und basierend auf Analysen des aktuellen Systemzustandes. Die Feinabstimmung der Parameter des Algorithmus für eine optimale Lösung der Anlagensteuerung ist auf einer realen Anlage nicht durchführbar, da zum einen zum Zeitpunkt, wenn die Anlagensteuerung programmiert wird, eine Anlage noch nicht fertig gebaut sein muss, und zum anderen, falls die Anlage bereits aufgestellt ist, es zu hohe Kosten verursachen würde und meist seitens des Anlagenbetreibers auch nicht erwünscht ist. Die erforderlichen Abstimmungen erfolgen daher mittels Emulation der Plattenaufteilanlage. Das Emulationswerkzeug, das auf diese Weise zur Entwicklung der Steuerungssoftware für Anlagen mit Rückführungen im Materialfluss beiträgt, ist beim Anlagenbauer bereits als entscheidungsunterstützendes System im Vertrieb in Verwendung (Schöch et al. 2011; Schöch et al. to appear). Die Anwendung der Emulation in der vorliegenden Problemstellung ist somit ein weiterer Schritt in Richtung des Zieles der Mehrfachnutzung des Emulationswerkzeuges.

In Abschnitt 2 wird auf das Emulationswerkzeug näher eingegangen. Im Anschluss daran erfolgt eine Beschreibung der Plattenaufteilanlagen mit Rückführungen im Materialfluss, bevor in Abschnitt 4 der Algorithmus zur Vermeidung von Deadlocks in Plattenaufteilanlagen und damit zusammenhängend die Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung unter Zuhilfenahme des Emulationswerkzeuges präsentiert werden. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick.

2 Emulation einer Plattenaufteilanlage

Die Steuerung einer Plattenaufteilanlage erfolgt mittels eines zentralen hierarchischen Systems. Wie in Abbildung 3 dargestellt, sendet die Anlagensteuerungsebene Befehle an die speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) der einzelnen Maschinen. Die SPS dient dann wiederum der Steuerung der Maschine beziehungsweise seiner mechanischen Komponenten (Feldebene). Diese beiden letzteren Schichten sind nun virtuell abgebildet worden. Da sie mit der Steuerungssoftware, die auch in der Realität die Plattenaufteilanlagen steuert, verbunden sind, spricht man von Emulation (McGregor 2002).

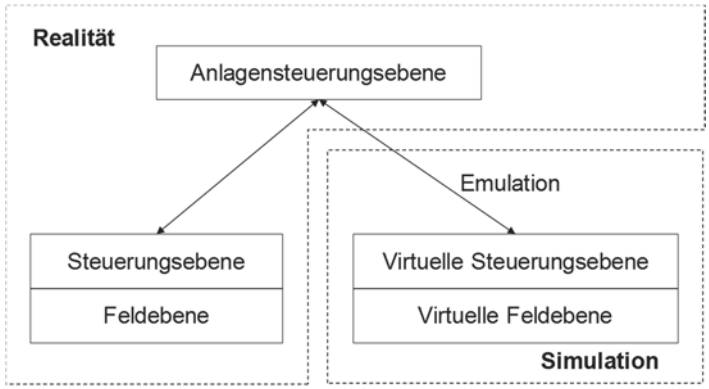


Abbildung 3: *Zentrales hierarchisches Steuerungssystem*

Genauer beschrieben schickt die Anlagensteuerungssoftware die Befehle an die virtuelle mittlere Schicht, die das Analogon zur SPS-Ebene darstellt. Sie teilt einen Befehl in eine Folge von Tasks auf. Solch eine Sequenz von Tasks wird dann anschließend von der mittleren Schicht an das Simulationsmodell übermittelt, das mit Hilfe einer Simulationssoftware implementiert ist. Die Tasksequenzen werden im Simulationsmodell den entsprechenden Maschinen zugeteilt. Nach Abarbeitung der einzelnen Tasks erfolgt über die mittlere Schicht die Bestätigung des Befehles an die Anlagensteuerung. Das Simulationsmodell umfasst also die virtuelle Abbildung der Feldebene: Es visualisiert die mechanischen Komponenten der Maschinen und stellt deren kinematische Bewegungen im Zusammenhang mit Materialtransport und -bearbeitung dar.

Die Modellierungstechniken für die Emulation entsprechen denen der ereignisdiskreten Simulation. Da die virtuellen Ebenen ihren Input von der Anlagensteuerung erhalten, enthält das Modell keine stochastischen Daten, was bedeutet, dass Unsicherheiten nicht abgebildet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Zeiten in der Anlagensteuerung und dem Simulationsmodell müssen die Ereignisse jedoch synchronisiert werden. Zu diesem Zweck ist eine Variante des „Blocking rendezvous pattern“ (Douglass 2004) implementiert worden, das korrekte zeitliche Abfolgen in der Befehlsübermittlung gewährleistet, und dadurch Simulationsgeschwindigkeiten, die ein Vielfaches der Realzeit betragen, erlaubt.

Eine ausführlichere Beschreibung des Emulationswerkzeuges, insbesondere der Systemarchitektur, sowie der Modellierungs- und Emulationsprozesse findet sich in Schöch et al. (2011) und Schöch et al. (to appear).

3 Anlagenlayout mit Rückführungen

In diesem Abschnitt wird ein Layout einer Plattenaufteilanlage beschrieben, dessen Materialfluss Rückführungen aufweist, und mit dem bisher gängigen Layout verglichen.

Wie in der Einführung bereits erwähnt ist aufgrund komplexerer Schnittpläne eine Änderung des Materialflusses erforderlich geworden, sodass nun eine Platte beliebig oft wieder derselben Säge zugeführt werden kann. Abbildung 4 zeigt die wichtigsten Maschinen einer beispielhaften Plattenaufteilanlage mit *Rückführungen im Materialfluss*: Nach der Beschickung des Systems mit Rohplatten und nach den ersten Aufteilungen auf Säge 1 wird entschieden, ob noch nicht fertig geschnittene Platten über eine Rückführstrecke wiederum der Säge 1 zugeteilt werden oder ob sie der zweiten oder dritten Säge zugeführt werden. Wird eine Platte der zweiten (oder dritten) Säge zugeordnet, so verbleiben sie beziehungsweise ihre Teile solange in diesem Sägekreis, bis sie fertig aufgeteilt sind. Jeder Sägekreis enthält eine Rollenbahnstrecke, die Pufferzwecken dient.

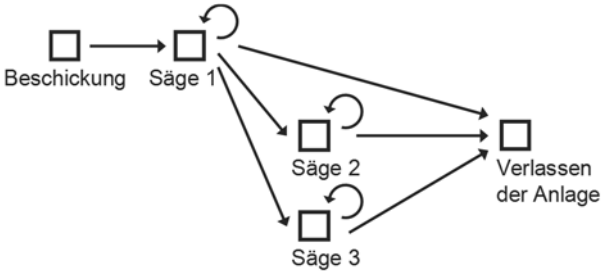


Abbildung 4: *Materialfluss einer Plattenaufteilanlage mit Rückführungen*

Die Herausforderung des neuen Anlagenlayouts liegt nun darin, dass Rückführungen im Materialfluss *Deadlocks* verursachen können. Es kann also vorkommen, dass eine Menge *S* von Platten existiert, von der jede Platte eine Maschine (Ressource) belegt und gleichzeitig auf das Freiwerden einer anderen Maschine wartet. Diese angeforderten Maschinen sind aber gerade von Platten aus der Menge *S* besetzt und können deshalb nicht freigegeben werden. Um zu verhindern, dass solche Situationen auftreten, muss eine in der Anlagensteuerung zu integrierende Strategie entwickelt werden.

Eine weitere Neuerung betrifft die Steuerung des Materialflusses durch die Anlage. Hinsichtlich der Wahl der Sägen gibt es zwar aufgrund technischer Spezifikationen Einschränkungen (beispielsweise betragen die maximalen Schnittlängen der Sägen 2 und 3 in Abbildung 4 jeweils nur 2,3 m, wohingegen die der ersten Säge 4,3 m misst), im Allgemeinen jedoch wird die Entscheidung, welche der Sägen benutzt werden soll, in Echtzeit auf Basis des aktuellen Zustandes der Anlage gefällt. Somit ist der Weg eines Teiles durch die Anlage zum Zeitpunkt, wenn es in die Anlage eintritt, noch nicht festgelegt und folglich ist der Materialfluss im Gegensatz zu bisherigen Anlagen nicht mehr vorausberechenbar. Diese Eigenschaft wird *flexibles Routing* genannt (De Toni und Tonchia 1998).

Die nächsten beiden Merkmale kennzeichnen zwar nicht nur Plattenaufteilanlagen mit Rückführungen, sondern ebenso solche mit linearem Materialfluss, sie müssen bei der Handhabung von Deadlocks aber berücksichtigt werden.

Wie die Bezeichnung „Plattenaufteilanlage“ schon impliziert, entstehen in einem Sägevorgang aus einer Platte zwei kleinere Platten, die in Folge meistens wieder als eigenständige Platten aufgefasst werden und deren nächste Bearbeitungsschritte auf unterschiedlichen Sägen erfolgen können. Die Anzahl der Platten im System kann sich demnach erhöhen, auch wenn keine neue Platte der Anlage zugeführt wird. Neben dieser Eigenschaft der *divergierenden Erzeugnisstruktur* (Günther und Tempelmeier 2012) betrifft eine weitere die Kapazität einer Maschine. In einer Plattenaufteilanlage werden die Teile überwiegend mittels Rollenbahnen transportiert. Je nach Größe der Platten passen unterschiedlich viele Platten auf eine Rollenbahn. Da die Rollenbahn einen Bauteil einer Maschine bildet, ist die *Kapazität der Maschine variabel*.

4 Deadlock-Vermeidung in einer Plattenaufteilanlage

Im Umgang mit Deadlocks in automatisierten Fertigungssystemen ist nach Zajac (2004) Deadlock-Vermeidung der bevorzugte Ansatz, da sich zum einen die umfangreichen Restriktionen der Strategien zur Deadlock-Verhinderung oft nachteilig auf die Auslastung der Maschinen auswirken und zum anderen die Deadlock-Erkennung und -Beseitigung ebenso wenig sinnvoll anwendbar ist. Letzteres ist dadurch bedingt, dass in automatisierten Fertigungssystemen der Abbruch von im Deadlock involvierten Prozessen meist unzulässig ist.

Das Verfahren zur Deadlock-Vermeidung, das im vorliegenden Fall einer Plattenaufteilanlage mit Rückführungen verwendet wird, und damit zusammenhängend die Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung mit Hilfe des Emulationswerkzeuges werden nun ausführlicher behandelt.

4.1 Verfahren zur Deadlock-Vermeidung

Um das Ziel eines deadlockfreien Betriebes der Plattenaufteilanlage bei gleichzeitiger hoher Auslastung der Sägen zu erreichen, ist in der Anlagensteuerungssoftware ein Verfahren zur Vermeidung von Deadlocks implementiert worden, die zu bestimmten Zeitpunkten den aktuellen Zustand der Anlage analysiert und aufgrund dessen eine Entscheidung fällt. Es gibt *zwei verschiedene Arten von Entscheidungen*. Zum einen muss nach der Freigabe der Maschinen, die einen Sägekreis beschicken, die Frage beantwortet werden, ob eine neue Platte dem Sägekreis zugeführt werden soll oder ob eine Platte, die sich bereits im Sägekreis befindet, der Maschine zugeteilt werden soll (Entscheidungen E1, E2 und E3 in Abbildung 5). Als Entscheidungsgrundlage dient hierfür der *diskrete Füllgrad* eines Sägekreises. Die zweite Art von Entscheidungen betrifft die Zuordnung der Teile zu den einzelnen Sägen in Echtzeit, oder anders gesagt das flexible Routing. Die Entscheidung E4 in Abbildung 5 ist diejenige zwischen Säge 1 und den anderen beiden Sägekreisen. Im Falle, dass die Platte nicht der ersten Säge zugeteilt wird, erfolgt anschließend noch die Wahl zwischen Säge 2 und 3 (E5). Diese Art von Entscheidungen beruht auf der Anzahl der *offenen Bearbeitungsschritte* der Platten, die sich in einem Sägekreis befinden. Sie beeinflusst hauptsächlich die Auslastung der Sägen, ist aber auch hinsichtlich der Vermeidung von Deadlocks relevant aufgrund der vorhin erwähnten Restriktionen in Bezug auf die Wahl der Sägen.

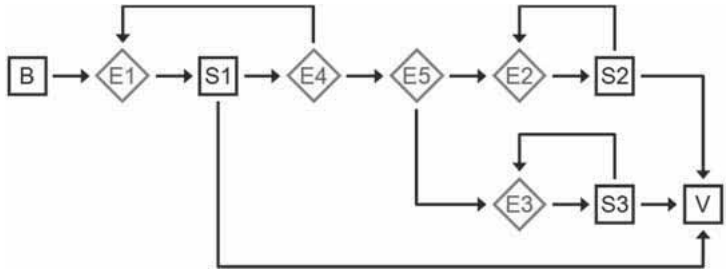


Abbildung 5: *Materialfluss mit Entscheidungen (B – Beschickung, S – Säge, V – Verlassen der Anlage, E – Entscheidung)*

Beide Arten von Entscheidungsregeln werden nun genauer beschrieben. Damit entschieden werden kann, ob eine neue Platte einem Sägekreis zugeführt werden soll, wird der *diskrete Füllgrad* dieses Sägekreises berechnet. Die Bestimmung erfolgt in vier Schritten:

1. *Auflisten der Maschinen des Sägekreises:* Die Maschinen des Sägekreises werden entgegen der Materialflussrichtung aufgelistet, beginnend mit derjenigen, die sich im Materialfluss vor der Maschine befindet, deren Aufgabe auch die Beschickung des Sägekreises ist.
2. *Auflisten der Platten des Sägekreises:* Die Platten, die sich aktuell im Sägekreis befinden, werden in derselben Reihenfolge wie die Maschinen betrachtet. Um aber der divergierenden Erzeugnisstruktur Rechnung zu tragen, wird nicht die Platte in die Liste aufgenommen, sondern stattdessen die Teile, die im Zuge des nächsten Sägendurchlaufes aus der Platte entstehen werden. Dabei werden Abfallteile in der Auflistung nicht berücksichtigt, da sie sofort nach dem Sägen entsorgt werden.
3. *Bestimmung der Größen der aufgelisteten Platten:* Für jedes aufgelistete Teil wird die längere der beiden Seitenabmessungen als Größe herangezogen, ungeachtet, wie das Teil auf einer Maschine platziert werden wird – die längere Seite parallel oder im rechten Winkel zur Materialflussrichtung. Es wird also der ungünstigere Fall unterstellt. Die Größe einer Maschine ist in diesem Kontext definiert als ihre Länge in Materialflussrichtung.
4. *Zuordnung der aufgelisteten Platten zu den Maschinen:* Die aufgelisteten Teile werden der Reihe nach den Maschinen zugeordnet. Ein Teil kann einer Maschine zugeteilt werden, wenn deren Kapazität noch nicht ausgeschöpft ist. Durch einen Vergleich der Platten- und Maschinengröße wird die Kapazität der nächsten Maschine in der Liste bestimmt, um derart die variablen Kapazitäten der Maschinen zu berücksichtigen.

Der diskrete Füllgrad eines Sägekreises ist nun die Anzahl der aufgelisteten Maschinen mit ausgeschöpfter Kapazität. Er wird als Entscheidungskriterium herangezogen: Ist die Anzahl größer als ein festgelegter Grenzwert, dann wird keine neue Platte dem Sägekreis zugeführt.

Die Entscheidungsregel für die Wahl der Säge vergleicht die Anzahl der noch anstehenden Bearbeitungsschritte der Sägekreise und priorisiert denjenigen Sägekreis mit den wenigsten Bearbeitungsschritten. Die Formel für die Berechnung der Anzahl der *offenen Bearbeitungsschritte* eines Sägekreises *OBS* lautet

$$OBS = \sum_{p \in P} \left(S_p + SD_p \right). \tag{1}$$

Es wird für jede Platte p aus der Menge P aller Platten, die sich in einem Sägekreis befinden, die Anzahl der offenen Bearbeitungsschritte ermittelt und anschließend aufsummiert. Die offenen Bearbeitungsschritte einer Platte p setzen sich aus der Anzahl der anstehenden *Schnitte* S_p und der Anzahl der dazu notwendigen *Sägendurchläufe* SD_p zusammen. Ein Sägendurchlauf umfasst alle Schnitte einer Platte, die durchgeführt werden können, ohne dass die Platte gedreht werden muss. Für die Platte mit dem in Abbildung 6 dargestellten Schnittplan berechnet sich die Anzahl der offenen Bearbeitungsschritte wie folgt. Die Anzahl der Schnitte beträgt sechszehn. Für die Aufteilung der Platte sind fünf Sägendurchläufe erforderlich: Die

Schnitte mit Nummern 1, 2 und 3 erfolgen, wenn die Platte das erste Mal eine Säge durchläuft. Die beiden schmalen Teile an den Rändern sind Abfall und werden sofort nach dem Sägen entsorgt, die anderen beiden Plattenteile durchlaufen jeweils erneut eine Säge, jedoch um neunzig Grad gedreht. Das sind Sägendurchlauf 2 mit Schnittnummern 4 bis 7 und Durchlauf 3 mit Schnittnummern 10 bis 14. Die Schnitte mit Nummern 8 und 9 bilden den vierten Sägendurchlauf und diejenigen mit Nummern 15 und 16 den fünften. Für die Anzahl der offenen Bearbeitungsschritte der dargestellten Platte ergibt sich somit 16 + 5 = 21.

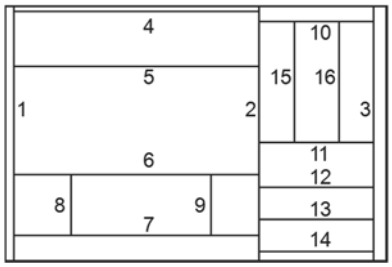


Abbildung 6: *Schnittplan einer Platte*

4.2 Deadlockfreie, optimierte Anlagenmodelle

Wie im vorangehenden Abschnitt erwähnt, ist das Ziel der Strategie zur Vermeidung von Deadlocks, eine hohe Auslastung von deadlockfreien Sägekreisläufen zu definieren. Die Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung soll anhand festgelegter kritischer Kennzahlen erfolgen. Solche Kennzahlen sind beispielsweise Zykluszeiten von Sägekreisläufen, Durchsatzraten von geschnittenen Teilen pro Minute und Auslastung einzelner Anlagenmodule. Dabei ist zu beachten, dass die Emulation nicht automatisch eine optimale Lösung erzeugt, sondern anhand von Entscheidungsregeln verschiedene Simulationsläufe erstellt und die Bestimmung einer optimalen Lösung ermöglicht.

In der Modellierung von Anlagen (Schöch et al. 2011) werden für eigens festgelegte Maschinen Entscheidungsregeln hinterlegt, die den Füllgrad sowie die anstehenden Bearbeitungsschritte für einen Sägekreislauf beschreiben. Die im Anlagenmodell hinterlegten Meta-Informationen dienen zur Simulationslaufzeit der Anlagensteuerung der automatischen Aktivierung der Entscheidungsregeln.

Nach Emulationsstart berechnet der Entscheidungsalgorithmus fortlaufend den aktuellen Füllgrad sowie die anstehenden Bearbeitungsschritte und vergleicht diese mit den in den einzelnen Maschinen hinterlegten Grenzwerten. In Abhängigkeit vom Vergleichsergebnis werden die nötigen Aufträge von der Anlagensteuerung den Maschinen zur Erzeugung und Abarbeitung der Tasksequenzen übergeben. Die anschließende Analyse der Simulationsergebnisse kann als Eingabe für Änderungen der Parameterwerte der Entscheidungsregeln dienen und zur erneuten Simulation führen. Das folgende Verfahren veranschaulicht die iterative Vorgehensweise zur Bestimmung der optimalen Lösung der Anlagensteuerung:

1. *Initialisierung:* Auswahl der minimalen Werte der Entscheidungsregeln, so dass gesichert ein deadlockfreier Sägekreislauf mit geringer Anlagenauslastung gegeben ist.

2. *Durchführung eines Simulationslaufes:* Bei jedem Lauf ist darauf zu achten, dass mit denselben Geschwindigkeiten der Sägen und sonstigen Maschinen simuliert wird.
3. Steht ein deadlockfreies Simulationsergebnis für die Analyse zur Verfügung, so können Parameterwerte für die Entscheidungsregeln erhöht werden. Mit Schritt 2 beginnt die nächste Iteration für einen Simulationslauf.
4. Tritt während der Simulation ein Deadlock auf, so sind die Parameterwerte für die Entscheidungsregeln zu verringern. Mit Schritt 2 beginnt die nächste Iteration für einen Simulationslauf.
5. Tritt während der Simulation ein Deadlock auf und es stehen bereits Simulationsläufe mit validen Einstellungswerten für die Entscheidungsregeln zur Verfügung, so steht die optimale Lösung der Anlagensteuerung zur Verfügung.
6. Treten keine deadlockfreien Simulationsläufe auf, so ist die Kapazität der Maschinen im Sägekreislauf, die der Pufferung dienen, zu erweitern. Mit Schritt 1 beginnt die erste Iteration mit dem neuen, adaptierten Anlagenmodell.

Die optimale Lösung der Anlagensteuerung basiert auf bestimmten Randbedingungen (Größe der Rohplatten und geschnittenen Teile oder Anzahl der Schnitte pro Sägezyklus) in Bezug auf die Flexibilität einzelner Schnittmuster für die Produktionslose.

5 Ergebnisse und Ausblick

Inhalt der Identifikation der prozess- und strukturinvarianten Eckpfeiler von Plattenaufteilanlagen ist die Analyse der Grenzen und Ausprägungen der Anlagen zwischen dem Eingang von Rohplatten und Ausgang zugeschnittener Platten. Das Entscheidungsunterstützungssystem gibt dem Anlagenexperten in Planungsprozessen nun die Möglichkeit, die Modellierung und Auswertung von Anlagen mit Rückführung zu bewerten. Der präsentierte Ansatz assistiert dem Anlagenexperten mit Hilfe der Strategie der Deadlock-Vermeidung inkrementell eine optimale Anlagenauslastung zu bestimmen und spart folglich im Planungsprozess Zeit und Kosten ein.

In der Weiterentwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems hat der nächste Schritt folgender Schwerpunkt: Derzeit basiert die Übertragung von Aufträgen und Tasksequenzen während der Emulation zwischen dem Anlagensteuerungssystem und dem zu steuernden System auf einem Kommunikationskanal. Anlagen mit Rückführungsausprägung haben eine Erhöhung des Kommunikationsaufwandes zur Folge und dadurch eine Verringerung der Simulationsgeschwindigkeit. Durch die Parallelisierung der Kommunikation soll die Simulationsgeschwindigkeit wesentlich erhöht werden.

Danksagung

Die Forschungsergebnisse wurden vom österreichischen COMET-Forschungsprogramm (COMpetence centers for Excellent Technologies) im Rahmen ProDSS (Integrated Decision Support Systems for Industrial Processes) gefördert.

Literatur

De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing Flexibility: A Literature Review. International Journal of Production Research 36 (1998) 6, S. 1587-1617.

Douglass, B. P.: Real Time UML: Advances in the UML for Real-time Systems. Boston: Addison-Wesley 2004.

Fanti, M. P.; Zhou, M.: Deadlock Control Methods in Automated Manufacturing Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans 34 (2004) 1, S. 5-22.

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.

McGregor, I.: The Relationship Between Simulation and Emulation. In: Yücesan, E.; Chen, C.-H.; Snowdon, J. L.; Charnes, J. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference 2002, S. 1683-1688.

Schöch, R.; Schmid, S.; Hillbrand, C.: Simulation Based Decision Support System for Cut-to-size Plants. In: Burczynski, T.; Kolodziej, J.; Byrski, A.; Carvalho, M. (Hrsg.): Proceedings 25th European Conference on Modelling and Simulation 2011, S. 394-400.

Schöch, R.; Schmid, S.; Hillbrand, C.: Optimising Plant Layout Decisions Based on Emulation Models – Technical Framework and Practical Insights. Angenommen zur Veröffentlichung von International Journal of Simulation and Process Modelling, Special Issue on: Research Challenges in Developing Advanced Solutions in Industry and Supply Chains Modelling and Simulation for Building 21st Century Enterprises, http://www.inderscience.com/info/ingeneral/forthcoming.php?jcode=ijspm.

Zajac, J.: A Deadlock Handling Method for Automated Manufacturing Systems. Annals of the CIRP 53 (2004) 1, S. 367-370.

Simulation in Produktion und Logistik
Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung
Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque & Alexander Klaas (Hrsg.)
Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe 2013

Methoden zur teilautomatischen Generierung von Emulationsmodellen

Methods for a Semiautomatic Generation of Emulation Models

Torben Meyer, Volkswagen AG, Wolfsburg (Germany),
torben.meyer@volkswagen.de

Steffen Straßburger, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau (Germany),
steffen.strassburger@tu-ilmenau.de

Abstract: Emulation models as the basis for virtual commissioning of control software and hardware are traditionally built manually and require a high amount of time and effort for building them. This paper addresses this issue by discussing different options for a semi-automatic generation of emulation models. We discuss different scenarios (from automatic emulation model generation to model transformation approaches) to and the associated benefits and requirements. Based on a comparison of the different scenarios, we discuss the economic efficiency and the applicability of all scenarios. Finally we present a prototypical implementation of a method for transforming a simulation model originally used for planning purposes into an emulation model used for virtual commissioning.

1 Einführung und Motivation

Die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) hat sich in den vergangenen Jahren als Methode zur Verkürzung der Inbetriebnahmedauer von Maschinen und Anlagen und zur Verbesserung des Softwaretests von Produktions- und Logistikleitständen sowie speicherprogrammierbaren Steuerungen etabliert (Salinas und Klemm 2010).

Methodisch basiert die VIBN auf einer Emulation des technischen Systems (Kövari 2011), welche erfahrungsgemäß mit großen Aufwänden verbunden ist. Das emulierte technische System wird in der VIBN typischerweise mit der realen Steuerung verbunden. Für die Erstellung der Emulationsmodelle bei der VIBN eines Produktions- oder Logistikleitstands werden häufig ereignisdiskrete Simulatoren aus dem Bereich der Produktion und Logistik eingesetzt (Gutenschwager et al. 2000).

In der Literatur sind vielfältige Nutzungsmöglichkeiten von Simulationsmodellen beschrieben (VDI 3633 Blatt 1). Diese lassen sich meist relativ exakt einzelnen Phasen des Lebenszyklus von Produktions- oder Logistiksystemen (z.B. Planung, Inbetriebnahme, Betrieb) zuordnen. Die Benutzung eines Simulationsmodelles über mehrere Lebenszyklusphasen hinweg (z.B. die Nachnutzung eines Modells der

Planungsphase in der Inbetriebnahme- oder Betriebsphase) wird gegenwärtig aber nur in ausgewählten Beispielprojekten erfolgreich umgesetzt (Mayer und Spieckermann 2010). Gründe hierfür liegen im Falle der VIBN häufig in der Tatsache, dass eine Simulation zur Inbetriebnahme (Emulation) aus Sicht des Auftraggebers nicht notwendig respektive bekannt ist oder als zu aufwandsintensiv eingeschätzt wird.

Das Prinzip der Emulation für die Inbetriebnahme von Steuerungssystemen ist in Abbildung 1 dargestellt. Auf der einen Seite ist bei der klassischen Simulation das simulierte Steuerungssystem mit dem simulierten technischen System verbunden (1). Auf der anderen Seite ist in der Realität das reale Steuerungssystem mit dem realen technischen System verbunden (3). Die Verbindung zwischen dem realen Steuerungssystem und dem simulierten technischen System (2) wird dann als Emulation bezeichnet. Dieses Szenario bildet die Basis der meisten VIBN-Ansätze. Zwischen den Steuerungssystemen und den technischen Systemen kommen Kommunikationsprotokolle zum Einsatz, deren konkrete Ausprägung nicht zuletzt von dem Anwendungsfall und den verwendeten Komponenten abhängt.

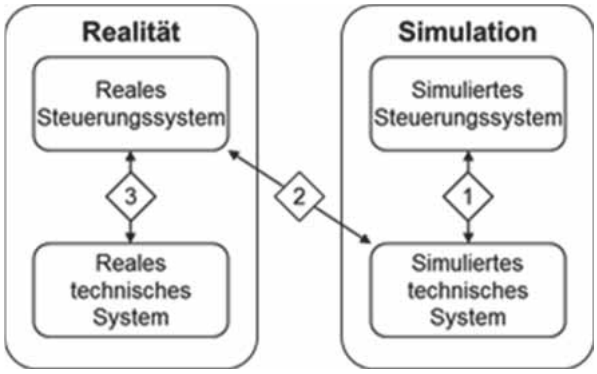


Abbildung 1: *Prinzip der Simulation und Emulation (in Anlehnung an Follert und Trautmann 2006)*

In diesem Aufsatz werden mehrere methodische Ansätze zur effizienteren Emulationsmodellerstellung diskutiert. Diese beruhen entweder auf einer durchgängigen Nutzung eines Teils des Simulationsmodells, einer teilautomatischen Transformation des Simulations- in ein Emulationsmodell oder auf einer teilautomatischen datengetriebenen Modellgenerierung.

2 Stand der Technik: Gegenwärtige Ansätze zur Modellgenerierung

Methoden zur automatischen oder teilautomatischen Generierung von Simulationsmodellen mit ereignisdiskreten Materialflusssimulatoren sind in der Literatur etabliert (Straßburger et al. 2010). Jörg und Wacker (2008) zeigten beispielsweise eine „generische Simulationslösung für Fördertechnik“. Ebenda wurde auf der Grundlage von Layoutdaten aus Planungssystemen der Digitalen Fabrik ein Simulationsmodell mit Fördertechnikelementen automatisiert erstellt. Auf

Eingangsdaten aus der betrieblichen Datenerfassung sowie der Produktionsplanung und -steuerung setzt Selke auf (Selke 2005).

Auch im Kontext der VIBN auf Feldebene (Anlagensimulation) sind Methoden zur (teil)-automatischen Modellgenerierung bekannt. Eine Möglichkeit zur automatisierten Generierung eines Simulationsmodells haben Barth und Fay (2010) vorgestellt. Aus der Maschinenbaubranche stellen Eger und Croon (2011) eine Möglichkeit zur Erstellung eines Modells zur virtuellen Inbetriebnahme „auf Knopfdruck“ dar. Als Eingangsdaten werden dabei vor allem die 3D-Geometrien (d.h. CAD-Daten) verwendet.

Unsere Literaturstudien haben gezeigt, dass bisher kaum Methoden zur automatischen oder teilautomatischen Generierung von Emulationsmodellen zur virtuellen Inbetriebnahme mit ereignis-diskreten Materialflusssimulatoren im Bereich von Produktion und Logistik verwendet werden. Diese Lücke soll in diesem Aufsatz mit einer Diskussion verschiedener Varianten adressiert werden.

3 Modellüberführung von der Simulation zur Emulation

Die Modelle der Materialflusssimulation lassen sich in verschiedenen Phasen verwenden. Neben der Planungsphase (Simulation), zählt dazu auch die Inbetriebnahmephase (Emulation) sowie die Betriebsphase (betriebsparallele Simulation, vgl. VDI 3633 Blatt 1). Eine Überführung des für die Planung erstellten Modells in die Inbetriebnahmephase ist (entsprechender Bedarf vorausgesetzt) aus wirtschaftlichen Gründen erstrebenswert, weil mehrfacher Modellierungsaufwand vermieden werden kann.

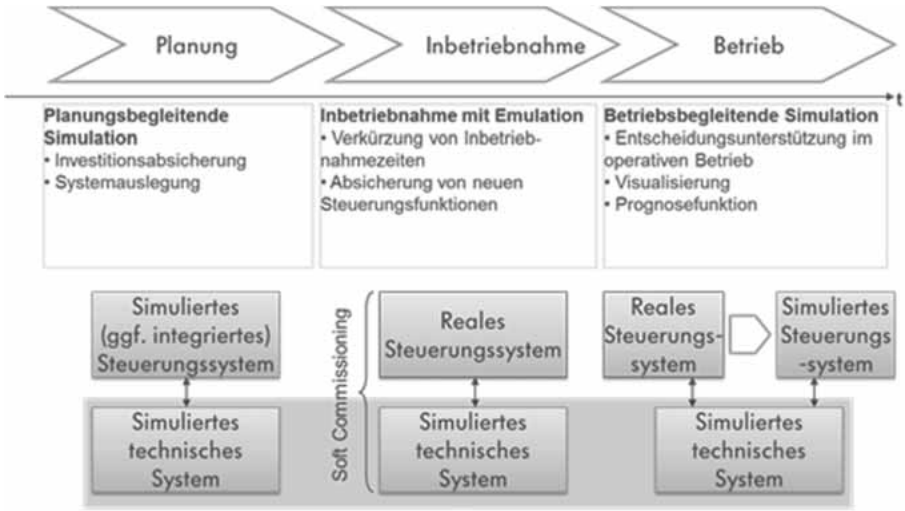


Abbildung 2: *Simulationsmodelle im Kontext des Lebenszyklus von Produktions- und Logistiksystemen*

Wie in Abbildung 1 dargestellt, verwenden sowohl das Simulations- als auch das Emulationsmodell ein simuliertes technisches System. Bei der Emulation wird

jedoch anstelle des simulierten Steuerungssystems eine Verbindung zum realen Steuerungssystem verwendet. Aus diesem Grund sind bei der Überführung von der Simulation zur Emulation entsprechende Anpassungen am Modell vorzunehmen. Dies betrifft die Kommunikation zum externen Steuerungssystem (d.h. die Implementierung der informationstechnischen Schnittstellenprotokolle) sowie vor allem die Übersetzung der externen Steuerungsinformationen in die korrekten Reaktionen der Modelllogik und die Übersetzung der Informationen vom Modell zurück zur realen Steuerung (z.B. Sensorsignale und Rückmeldungen).

Das simulierte Steuerungssystem ist somit für das Emulationsmodell nicht erforderlich. Aus der Sichtweise der Emulation ist es wünschenswert, dass bereits während der Erstellung des Simulationsmodells eine Trennung zwischen simuliertem technischen System und simulierten Steuerungssystem an den Stellen vorgenommen wird, an denen auch in der Realität zwischen realem Steuerungssystem und realem technischen System entsprechende Schnittstellen existieren (s. Abb. 2). Dies vereinfacht die Erstellung des Emulationsmodells, da die Trennung bereits an den richtigen Stellen durchgeführt wurde. Bisher ist eine solche modulare Trennung zwischen Steuerung und technischem System im Simulationsmodell jedoch nicht durchgehend anzutreffen.

Darüber hinaus lässt sich ein durchgängiges simuliertes technisches System, welches für die Planungs- oder Inbetriebnahmesimulation erstellt wurde, auch für die Betreibersimulation weiternutzen. In diesem Fall wird das simulierte technische System zuerst vom realen technischen System vorbelegt. Dies kann entweder auf der Basis der betrieblichen Datenerfassung erfolgen oder indem die Steuerungsbefehle zwischen realer Steuerung und realem technischen System auch von dem simulierten technischen System interpretiert werden. Zu einem definierten Zeitpunkt, beispielsweise wenn eine operative Entscheidungsunterstützung notwendig geworden ist, wird die Verbindung zur realen Steuerung getrennt und durch die simulierte Steuerung ersetzt. Das so skizzierte Verfahren entspricht der aus der Literatur bekannten „Online-Simulation“ (Davis 1998).

4 Methoden zur teilautomatischen Generierung von Emulationsmodellen

Grundsätzlich lassen sich vier verschiedene Möglichkeiten zur Erstellung bzw. Überführung eines Emulationsmodells unterscheiden (vgl. Abb. 3): Entweder wird ein Modell in der Planung und Inbetriebnahme durchgängig und ohne dedizierte Transformation genutzt (Variante 1), das Simulationsmodell wird teilautomatisch in ein Emulationsmodell überführt (Variante 2) oder das Emulationsmodell wird ohne Nutzung eines gegebenenfalls vorhandenen Simulationsmodells erstellt (Variante 3). Als vierte Variante wird eine Generierung aus Quellsystemen diskutiert. Darüber hinaus ist ebenfalls eine Kombination der Varianten denkbar.

Die Idee der *Variante 1* ist die durchgängige Nutzung des Modells sowohl für die Planung als auch für die Inbetriebnahme einer Anlage. Die Grundlage dafür bildet die Tatsache, dass in beiden Nutzungsmöglichkeiten das simulierte technische System verwendet wird (vgl. Abb. 2).

Dies bedingt allerdings die Deaktivierung der in der Planungssimulation vorhandenen simulierten Steuerung und stattdessen die Anbindung an die reale

Steuerung. Eine Ergänzung des Modells um die Möglichkeit zur Kommunikation mit der realen Steuerung ist zu realisieren.

Eine Voraussetzung zur Unterstützung einer durchgängigen Modellierung des technischen Systems ist, dass die notwendige Trennung von Steuerung und technischem System bereits während der Erstellung des Simulationsmodells berücksichtigt wird, also die Schnittstellen zwischen simulierten technischen System und simulierter Steuerung vergleichbar zu den Schnittstellen im realen System sind. Dies ist allerdings nur möglich, wenn die Schnittstellen bereits während der Planung bekannt sind.

Die Vorteile der Variante 1 sind somit, dass das Modell des simulierten technischen Systems übernommen werden kann und auf diesem Weg keine Anpassung für das Emulationsmodell notwendig ist. Nachteilig ist allerdings, dass diese Modellierungsweise nur einsetzbar ist, wenn frühzeitig die Schnittstellen des realen Systems bekannt sind oder geeigneten Schnittstellen- oder Architekturstandards gefolgt wird.

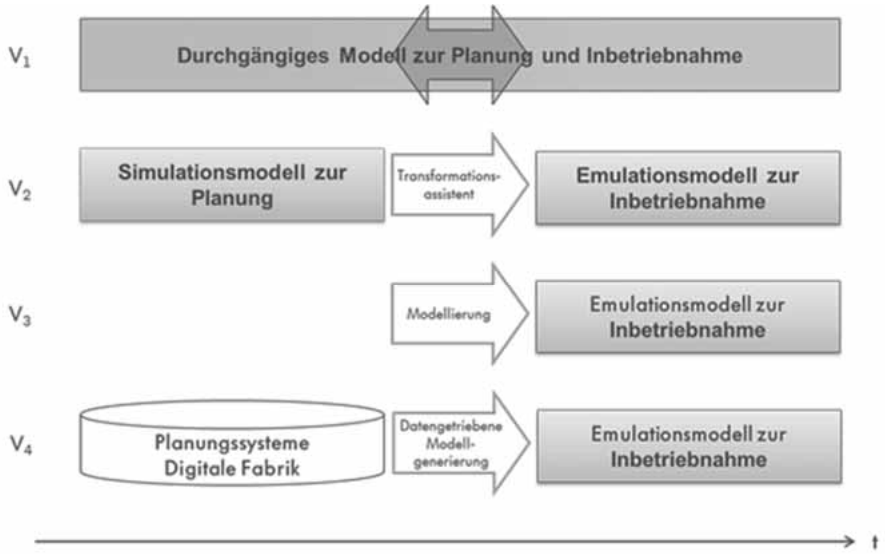


Abbildung 3: *Varianten zur Erstellung eines Emulationsmodells*

Variante 2 setzt voraus, dass ein Simulationsmodell aus der Planungsphase existiert, das als Emulationsmodell weiterverwendet werden soll. Der methodische Ansatz ist die Transformation von Simulationsobjekten in Objekte, die die Emulation unterstützen. Dies wird dadurch erreicht, dass jeder Objektklasse in der Simulation mindestens eine äquivalente Klasse von Emulationsobjekten gegenübersteht. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise mit einem Transformationsassistenten Modelle überführen.

Bei der Transformation wird das Simulationsobjekt durch eine Instanz der assoziierten Klasse für die Emulation ersetzt. Darüber hinaus ist auch die

Konfiguration, also der Inhalt der Objektattribute, zu übernehmen. Schließlich ist auch noch die Materialflussverknüpfung auf das neue Objekt zu übertragen.

Voraussetzung für die Durchführung einer derartigen Transformation ist allerdings die Implementierung von Objektklassen für die Emulation, welche inhaltlich die Simulationsobjekte ergänzen können und darüber hinaus auch die notwendigen Voraussetzungen zur Kommunikation mit der realen Steuerung erfüllen. Eine weitere Prämisse ist, dass das Simulationsmodell in großem Maße auf den Einsatz von instanziierten Objekten von einer überschaubaren Anzahl an Klassen setzt. Die Vorteile dieses Vorgehens sind in der Möglichkeit einer weitgehend automatischen Transformation des Modells zu sehen.

Sollten die ersten beiden Möglichkeiten aus technischen (Überführung zu aufwendig) oder organisatorischen Gründen (kein Simulationsmodell vorhanden) nicht in Betracht kommen, so ist ein Aufbau des Emulationsmodells von Null an ggf. notwendig (*Variante 3*). Dies erfolgt über eine unter Umständen aufwendige Modellierung des gesamten Emulationsmodells, so dass bei dieser Variante auch nicht von einer (teil)-automatischen Generierung des Modells gesprochen werden kann.

Auf der einen Seite ist der Vorteil der Modellierung ohne eine vorhandene Basis (Simulationsmodell aus der Planungsphase oder eine anderes System als Datenquelle), dass dieser Ansatz immer anwendbar also universell einsetzbar ist. Auf der anderen Seite wird diese Art der Flexibilität in der Modellierung auch durch einen hohen Aufwand in der Modellierungsphase erkauft, da das Wissen, welches in den anderen Varianten übernommen werden konnte in dieser Variante ggf. erneut aufgebaut werden muss. Variante 3 wird somit in den meisten Anwendungsfällen der Emulation als am aufwendigsten einzustufen sein.

Die *vierte Variante* basiert auf einer „datengetriebene(n) Modellgenerierung“ (Eckardt 2002). In dem Bereich der Planungssimulationen ist die Möglichkeit der (teil-)automatischen Modellgenerierung aus verfügbaren innerbetrieblichen Datenquellen in der Literatur diskutiert worden (Straßburger et al. 2010). Die Kernidee der Variante 4 ist die Übertragung der Methode der datengetriebenen Modellgenerierung auf die Inbetriebnahmephase eines Produktions- und Logistiksystems, um an einem möglichst weitgehend generierten Emulationsmodell die Erprobung und Testung von Steuerungssoftware durchzuführen.

Die Voraussetzung für die Generierung eines Emulationsmodells ist das Vorhandensein einer ausreichenden Datenbasis. Während für die Generierung eines Modells bei einer Planungssimulation für eine Produktionsmaschine beispielsweise schon die Taktzeit, die Verfügbarkeit, die Materialflussverkettung, etc. ausreichend sind, werden für Generierung von Emulationsmodellen detaillierte Informationen, wie z. B. das Signalverhalten für die externe Steuerung benötigt. Für emulierte Komponenten lassen sich diese Informationen zur Ansteuerung beispielsweise der Komponentendokumentation entnehmen.

Als Datenquelle kommen grundsätzlich Planungssysteme, etwa aus dem Bereich der Digitalen Fabrik (z.B. E-CAD-Systeme für die Elektrotechnikplanung), in Frage. Darüber hinaus ist außerdem zu berücksichtigen, dass die relevanten Daten frühzeitig zur Verfügung stehen. Die Informationen aus den Planungssystemen bilden die Grundlage für die Instanziierung von Simulationsobjekten aus einer Simulations- bzw. Emulationsobjektbibliothek, welche eine Voraussetzung für die

Durchführung einer derartigen datengetriebenen Modellgenerierung ist und für eine spezielle Reihe von gleichartigen Anwendungsfällen erschaffen worden ist.

Damit ist die Durchführung von Variante 4 besonders wirtschaftlich, wenn eine größere Anzahl von Emulationsmodellen mit einer vorliegenden Bibliothek generiert wird. Im Gegensatz zu den vorherigen Varianten 1 und 2 wird in dieser Variante allerdings das ggf. vorhandene Simulationsmodell aus der Planungsphase nicht genutzt, so dass es zu Unterschieden zwischen geplanter und realisierter Anlage kommen kann.

Die Varianten 1, 2 und 3 konnten in der betrieblichen Praxis (zum Teil prototypisch) umgesetzt werden. Aufgrund unzureichender Datenquellen steht die Evaluierung von Variante 4 noch aus.

5 Prototypische Umsetzung

Die Umsetzbarkeit der oben vorgestellten Variante 2 wurden im Rahmen einer prototypischen Implementierung evaluiert. Zum Einsatz gekommen ist dabei der Simulator Plant Simulation 10.0 von Siemens PLM mit dem Automotive Bausteinkasten des VDA (Verband der Automobilindustrie). Der Automotive Bausteinkasten ist bei vielen deutschen Automobilherstellern als Objektbibliothek zum standardisierten und effizienten Simulationsmodellaufbau im Einsatz (Mayer und Pöge 2010).

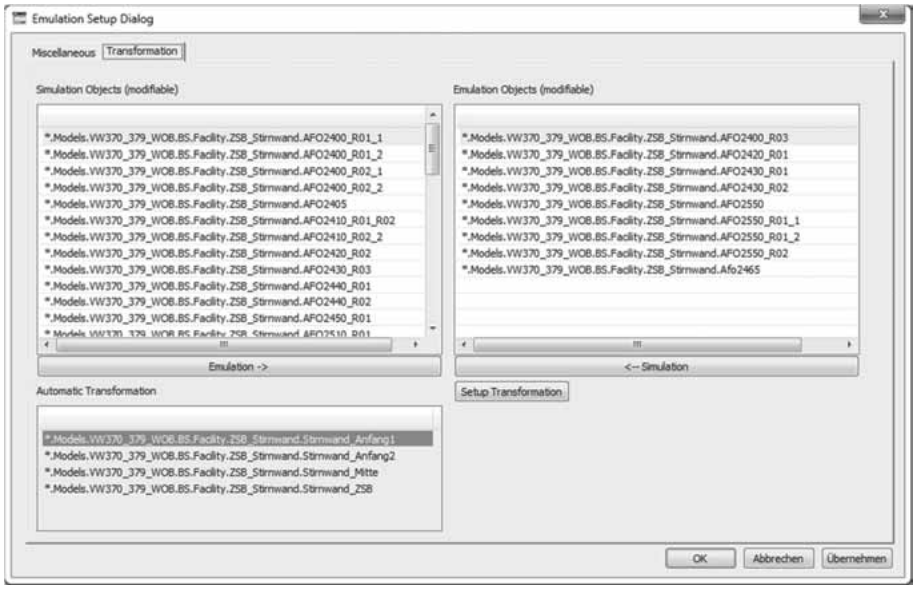


Abbildung 4: *Screenshot des Assistenten für die Transformation*

Im Kern des Prototyps steht ein Assistent (vgl. Abb. 4), welcher die Transformation durchführt. Das gesamte Simulationsmodell wie in einer Baumstruktur von der Wurzelebene an durchsucht und sämtliche Simulationsobjekte, die für eine Transformation in Betracht kommen, werden registriert. Dafür ist eine

Konfiguration erforderlich, die festlegt welche Simulationsklasse mit welchen Emulationsklassen assoziiert ist. Darüber hinaus sind auch die zu übertragenden Attribute zu konfigurieren.

Im Assistenten können die erkannten Objekte ausgewählt werden und transformiert werden. Die einzelnen Simulationsobjekte werden dann eins zu eins in das assoziierte „Emulationsobjekt“ transformiert. Dabei wird zunächst jeweiliges Emulationsobjekt erzeugt und entsprechend benannt. Die Materialflussverknüpfungen werden vom alten auf das neue Objekt übertragen. Anschließend erfolgt die Übertragung der Werte von (vorher konfigurierten) Attributen. Schließlich kann das alte Objekt entfernt werden.

Die Objektklasse Querverschiebewagen (QVW) aus dem VDA Automotive Bausteinkasten hat bereits eine einfache Steuerungslogik für die Simulation vorimplementiert, die ankommende Paletten (o.ä.) abholt, mit einem QVW transportiert und an konfigurierten Ausgängen abgibt. Auf dieser Grundlage wurde ein Baustein für die Emulation erstellt. An allen Stellen, wo der QVW Fahranweisungen (nächster Aufnahme- oder Absetzpunkt) anfragt bzw. Statusrückmeldungen (Beginn und Ende von Lade- bzw. Endlagevorgängen) liefert, werden Meldungen an die externe, reale Steuerung abgesetzt.

Die Emulationslogik ist in diesem Fall schnittstellenübergreifend implementiert und abstrahiert von der konkret genutzten informationstechnischen Basis (wie z.B. OPC oder Profibus). Über standardisierte Funktionsaufrufe können so genannte Transportaufträge angelegt, verändert und gelöscht werden. Diese Transportaufträge werden dann durch den QVW abgearbeitet. Für spezifische Projekte sind in diesem Fall also nur noch die Anpassungen für die externen Schnittstellen durchzuführen.

Darüber hinaus wurde der VDA-Baustein für einen Kanbanpuffer ebenfalls angepasst. Der Simulationsbaustein reagiert auf eingehende Abrufe aus dem (sortenreinen) Puffer und löst ggf. Abrufe in vorgelagerten Kanban-Bausteinen aus. Ebendiese Funktionen werden in einem zweiten Emulationsbaustein auch der Emulation zur Verfügung gestellt.

Erfahrungsgemäß lassen sich projektspezifische Anpassungen in der Emulation, also die Einführung von weiteren Objekten, nicht vermeiden. Aus diesem Grund wurde eine Vorlage für Emulationsbausteine entwickelt, die bereits die wichtigsten Anforderungen abdeckt. Dieser Baustein enthält eine lokale Signalliste (Signalbezeichnung, aktueller Wert, Methode für den Aufruf bei einer Wertänderung sowie den Initialisierungswert), eine Methode zur Kommunikation mit externen Steuerungen und für die Emulation angepasste Initialisierungs- und Reset-Methoden.

6 Zusammenfassung und Bewertung

In einer vorherigen Publikation wurde bereits der Aufbau von Objektbibliotheken für die Emulation bei vorhandenen Simulationsobjektbibliotheken diskutiert (Meyer et al. 2012). Dieser Aufsatz fokussierte nun auf die Automatisierung des Übergangs von einem Simulations- zu einem Emulationsmodell. Hierzu wurden vier verschiedene Varianten diskutiert, die entweder auf bestehenden Simulationsmodellen aufsetzten, eine datengetriebene Modellgenerierung nutzen oder eine vollständige Neumodellierung einsetzen.

Im Abschnitt Stand der Technik wurde bereits verdeutlicht, dass zwischen automatischen und teilautomatischen Ansätzen zur Simulationsmodellgenerierung unterschieden werden muss. Die Ansätze dieses Aufsatzes sind eindeutig in den Bereich der teilautomatischen Generierung einzuordnen, da eine Anpassung von Simulationsobjekten/-bausteinen an individuelles Verhalten, welches außerhalb von den definierten Freiheitsgraden der Simulationsobjektbibliotheken liegt, nie ausgeschlossen werden kann, sondern sogar berücksichtigt und zugelassen werden muss.

Generell ist sowohl bei automatischen als auch teilautomatischen Ansätzen der Modellgenerierung zu beachten, dass diese auf entsprechenden Bibliotheken aufsetzen. Erst der Aufbau dieser Bibliotheken ermöglicht die effiziente Generierung von Modellen, verursacht aber seinerseits beachtenswerte Aufwände durch die erstmalige Erstellung und die regelmäßig Pflege. Folglich muss den Initialaufwänden eine ausreichende Anzahl an Emulationsprojekten, die die Modellgenerierung nutzen, gegenüberstehen, um die Wirtschaftlichkeit dieses Ansatzes zu gewährleisten.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die vorgestellten Methoden einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit der Emulation leisten. Die Auswahl der konkreten Methoden ist dabei projekt- und kontextabhängig

Literatur

Barth, M.; Fay, A.: Automatische Generierung von objektorientierten Simulationsmodellen für die Unterstützung des PLS-Test-Engineerings. In: Jumar, U.; Schnieder, E.; Diedrich, C. (Hrsg.): 11. Fachtagung EKA mit Tutorium, Magdeburg, 25.-27. Mai 2010, S. 235-244.

Davis, W. J.: On-Line Simulation: Need and Evolving Research Requirements. In: J. Banks, J. (Hrsg.) Handbook of Simulation. John Wiley & Sons Inc. 1998, S. 465-516.

Eckardt, F.: Ein Beitrag zu Theorie und Praxis datengetriebener Modellgeneratoren zur Simulation von Produktionssystemen. Dissertation. Aachen: Shaker 2002.

Eger, U.; Croon, N.: Generierung virtuelle Maschinen zur virtuellen Inbetriebnahme auf Knopfdruck. In: Bender, K. (Hrsg.): SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 22.-24. November 2011, S.205-213.

Follert, G.; Trautmann, A.: Emulation intralogistischer Systeme. In: Wenzel, S. (Hrsg.): 12. ASIM Fachtagung, Kassel, 26.-27. September 2006, S. 521-530.

Gutenschwager, K.; Fauth, K.-A.; Spieckermann, S.; Voß, S.: Qualitätssicherung lagerlogistischer Steuerungssoftware durch Simulation. Informatik-Spektrum 23 (2000) 1, S. 26-37.

Jörg, T.; Wacker, R.: Generische Simulationslösung Fördertechnik. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation For Production and Logistics Applications, Berlin, 1.-2. Oktober 2008, S. 11-20.

Kövari, L.: Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen. Dissertation. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011.

Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard - Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.):

Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 29-36.

Mayer, G.; Spieckermann, S.: Life-cycle of simulation models: requirements and case studies in the automotive industry. Journal of Simulation 4 (2010) 4, S. 255-259.

Meyer, T.; Straßburger, S.: Using protocol state machines to support simulation-based emulation projects. In: Geril, P.; Klumpp, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 European Simulation and Modelling Conference, Essen, 22.-24. Oktober 2012, S. 234-238.

Meyer, T.; Pöge, C.; Mayer, G.: Integration of Emulation Functionality into an established Simulation Object Library. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, Berlin, 11.-14. Dezember 2012, ohne Seitenzahl.

Salinas, L.; Klemm, P.: Virtuelle Inbetriebnahme und Test von Leitsystemen. In: Bender, K. Schumacher, W. (Hrsg.): SPS/IPC/Drives 2010, Nürnberg, 23.-25. November 2010, S.435-443.

Selke, C.: Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung. Dissertation. Technische Universität München 2005.

Straßburger, S.; Bergmann, S.; Müller-Sommer, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 37-44.

VDI 3633, Blatt 1, Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Berlin: Beuth 2007.

Autorenindex

Alias, Cyril 349
Altendorfer, Klaus 621
Angelidis, Evangelos 77, 337
Astour, Habeb 515
Atorf, Linus 417
Beißert, Ulrike 157, 491
Böhle, Carsten 177
Bohn, Daniel 77, 337
Boyaci, Pinar 679
Bracht, Uwe 61
Brodhun, Christoph 601
Brosch, Patrick 61
Burger, Thomas 21
Carl, Sebastian 337
Cirullies, Jan 491
Claus, Thorsten 569, 591, 601, 631
Clausen, Uwe 207, 293
Dabidian, Peiman 207
Dangelmaier, Wilhelm 227
De Backer, Philippe 1
Deininger, Maik 579
Diekmann, Daniel 207
Drescher, Benny 271
Dreßler, Daniel 157
Dunke, Fabian 405
Eckert, Carsten 283
Englberger, Julian 631
Felberbauer, Thomas 621
Fleisch, Ruth 731
Fleischmann, Anna-Charlotte 61
Fonseca i Casas, Pau 237
Forster, Theo 197
Franke, Hubertus 559

Franz, Volkhard 505, 515, 525
Fritsch, Martin 721
Galka, Stefan 167
Gamber, Thilo 315
Gausemeier, Jürgen 469
Gißrau, Mike 133
Goedicke, Ina 207
Görzel, Stefan 99
Grienitz, Volker 99
Groß, Rainer 721
Groß, Sven 145
Guiffo Kaigom, Eric 417
Güller, Mustafa 427
Gunia, Benjamin 709
Günthner, Willibald A. 167
Gutenschwager, Kai 247
Harjes, Florian 217
Hauptvogel, Annika 651
Hausicke, Michael 99
Hegmanns, Tobias 145
Heisig, Benjamnin 689
Hellingrath, Bernd 177
Helmus, Manfred 549
Hennies, Til 459
Herrmann, Frank 591, 631
Höppe, Norbert 669
Huber, Daniel 437
Hübler, Michael 305
Ilg, Rolf 21
Jodlbauer, Herbert 621
Jósvai, János 71
Juan, Angel A. 237, 641
Kaffka, Jan 293
Kalkan, Yakup 349
Kamphues, Josef 145
Kiefer, Jens 271

Klaas, Alexander 227
Klenk, Eva 167
Klotz, Thomas 385
Koç, Emre 325, 349
Kohn, Robert 121
Köhne, Hermann 247
König, Markus 549
Kopecki, Lukas 1
Korth, Benjamin 145
Krückhans, Björn 31
Kruse, Thorsten 699
Lange, Frederick 591
Laroque, Christoph 227, 537
Laußat, Lars 549
Lemessi, Marco 87
Lentes, Joachim 21
Leupold, Michael 315
März, Lothar 661
Mas, Silvia 237
Matysczok, Carsten 41
Mayer, Gottfried 11
Meier, Horst 31
Meyer, Torben 741
Middelhoff, Michael 177
Mouelhi, Mohamed 325
Müller, Christian 325
Müller, Christiane 651
Müller-Feuerstein, Sascha 721
Nehls, Uwe 569
Nickel, Stefan 405
Noche, Bernd 325, 349, 427
Özgür, Çağdaş 325
Pawletta, Thorsten 481
Petersen, Marcus 469
Pflegerl, Robert 731
Pöge, Carsten 11

Potente, Till 651
Pöting, Moritz 207
Prante, Thorsten 731
Putz, Matthias 187
Rabe, Markus 579, 641
Rank, Sebastian 395
Reggelin, Tobias 459
Renken, Hendrik 227
Rose, Oliver 77, 121, 133, 337, 611
Roßmann, Jürgen 361, 417
Rudtsch, Vinzent 469
Samkari, Kais 505, 525
Schele, Moritz 41
Schlegel, Andreas 187
Schlette, Christian 361, 417
Schmidt, Artur 481
Schmidt, Thorsten 385, 395
Schmidtmann, Achim 689, 699, 709
Schmitz, Markus 373
Schöch, Robert 731
Scholl, Wolfgang 109
Scholz-Reiter, Bernd 217
Schuh, Günther 651
Schulze, Thomas 87
Schwede, Christian 491
Seeanner, Florian 669
Soyka, Michael 305
Spath, Dieter 21
Spieckermann, Sven 669
Staab, Tobias 167
Stange, Carsten 349
Steinhauer, Dirk 283, 305
Stich, Peter 271
Stoldt, Johannes 187
Straßburger, Steffen 741
Straube, Bernd 385

Stumvoll, Ulrike 569
Szczesny, Kamil 549
Tänzer, Christian 87
Teich, Enrico 601
Teitge, Philipp 283
Thomas, Christina 651
Tolujew, Juri 459
Turek, Karsten 385
Uhlig, Tobias 395
Wagenitz, Axel 491
Weigert, Gerald 447
Wendt, Karsten 259
Wenzel, Sigrid 373, 537, 679
Wilson, Heike 41, 259
Winkler, Joachim 689
Zajac, Markus 145
Zettl, Reik 259
Zhang, Tao 611
Zülch, Gert 53, 315

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrows economy.

Today eight Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 1 FAHRWINKEL, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-00-0

Bd. 2 HORNBOSTEL, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 2, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-01-9

Bd. 3 STEMANN, V.: Contention Resolution in Hashing Based Shared Memory Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 3, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-02-7

Bd. 4 KETTERER, N.: Beschreibung von Datenaustausch eines verteilten Fertigungssteuerungssystems. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 4, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-03-5

Bd. 5 HARTMANN, T.: Spezifikation und Klassifikation von Methoden zur Definition hierarchischer Abläufe. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 5, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-04-3

Bd. 6 WACHSMANN, A.: Eine Bibliothek von Basisdiensten für Parallelrechner: Routing, Synchronisation, gemeinsamer Speicher. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 6, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-05-1

Bd. 7 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Die Szenario-Technik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. 1. Paderborner Szenario-Workshop, 14. November 1995, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 7, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-06-X

Bd. 8 CZUMAJ, A.: Parallel Algorithmic Techniques: PRAM Algorithms and PRAM Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 8, Paderborn, 1995 – ISBN 3- 931466-07-8

Bd. 9 HUMPERT, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 9, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-08-6

Bd. 10 AMEUR, F.: Space-Bounded Learning Algorithms. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 10, Paderborn, 1995 –ISBN 3-931466-09-4

Bd. 11 PAUL, M.: Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 11, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-10-8

Bd. 12 HOLL, F.: Ordnungsmäßigkeit von Informations- und Kommunikationssystemen. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 12, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-11-6

Bd. 13 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): First European Workshop on Global Engineering Networking - organized by GLENnet e.V., HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 13, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-12-4

Bd. 14 PETRI, K.: Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 14, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-13-2

Bd. 15 LESCHKA, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 15, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-14-0

Bd. 16 SCHNEIDER, U.: Ein formales Modell und eine Klassifikation für die Fertigungssteuerung - Ein Beitrag zur Systematisierung der Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 16, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-15-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 17 FELSER, W.: Eine Methode zur Erstellung von Fertigungssteuerungsverfahren aus Bausteinen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 17, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-16-7

Bd. 18 GAUSEMEIER, J.; ALEXANDER FINK, A.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Erfolgspotentiale der Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 18, Paderborn, 1996– ISBN 3-931466-17-5

Bd. 19 DANGELMAIER, W.; GAUSEMEIER, J.: Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung und Fertigung. 2. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 19, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-18-3

Bd. 20 HÜLLERMEIER, E.: Reasoning about Systems based on Incomplete and Uncertain Models. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 20, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466- 19-1

Bd. 21 GAUSEMEIER, J.: International Symposium on Global Engineering Network - Antwerb, Belgium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 21, Paderborn, 1997 – ISBN 3- 931466-20-5

Bd. 22 BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 22, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-21-3

Bd. 23 GAUSEMEIER, J.: Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik - Paderborner Workshop TransMechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 23, Paderborn, 1997 – ISBN 3- 931466-22-1

Bd. 24 GERDES, K.-H.: Architekturkonzeption für Fertigungsleitsysteme der flexiblen automatischen Fertigung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 24, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-23-X

Bd. 25 EBBESMEYER, P.: Dynamische Texturwände - Ein Verfahren zur echtzeitorientierten Bildgenerierung für Virtuelle Umgebungen technischer Objekte. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 25, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-24-8

Bd. 26 FRANK, G.: Ein digitales Hardwaresystem zur echtzeitfähigen Simulation biologienaher neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 26, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-25-6

Bd. 27 DITTRICH, W.: Communication and I/O Efficient Parallel Data Structures. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 27, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-26-4

Bd. 28 BÄUMKER, A.: Communication Efficient Parallel Searching. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 28 Paderborn, 1997 – ISBN 3- 931466-27-2

Bd. 29 PINTASKE, C.: System- und Schaltungstechnik neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 29, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-28-0

Bd. 30 HENKEL, S.: Ein System von Software-Entwurfsmustern für die Propagation von Ereignissen in Werkzeugen zur kooperativen Fabrikmodellierung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 30, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-29-9

Bd. 31 DANGELMAIER, W.: Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 31, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-30-2

Bd. 32 BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 32, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-31-0

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 33 HAHN, A.: Integrationsumgebung für verteilte objektorientierte Ingenieursysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 33, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-32-9

Bd. 34 SABIN, A.: Semantisches Modell zum Aufbau von Hilfsorientierungsdiensten in einem globalen Engineering Netzwerk. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 34, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-33-7

Bd. 35 STROTHMANN, W.-B.: Bounded Degree Spanning Trees. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 35, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-34-5

Bd. 36 MÜLLER, W.; RAMMIG, F.-J.: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 36, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466- 35-3

Bd. 37 SCHNEIDER, W.: Anwenderorientierte Integration von CAE-Systemen. Ein Verfahren zur Realisierung eines durchgehenden Informationsflusses entlang des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 37, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-36-1

Bd. 38 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Aachener Workshop TransMechatronik, 26. Juni 1998, Technologiezentrum am Europaplatz Aachen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 38, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-37-X

Bd. 39 GROBBEL, R.; LANGEMANN, T.: Leitfaden PPS-Systeme: Auswahl und Einführung in der Möbelindustrie. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 39, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-38-8

Bd. 40 REHBEIN, P.: Tribologische Untersuchung von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in Reibkraftschlüssigen Antrieben. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 40, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-39-6

Bd. 41 DANGELMAIER, W.: KOMNET – Kommunikationsplattform für KMU-Netzwerke. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 41, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-40-X

Bd. 42 KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-41-8

Bd. 43 TRAPP, R.: Stereoskopische Korrespondenzbestimmung mit impliziter Detektion von Okklusionen. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 43, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-42-6

Bd. 44 GAUSEMEIER, J.; FINK, A; SCHLAKE, O.: Grenzen überwinden - Zukünfte gestalten. 2. Paderborner Konferenz für Szenario-Management, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 44, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-43-4

Bd. 45 nicht erschienen!

Bd. 46 VÖCKING, B.: Static and Dynamic Data Management in Networks. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 46, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-45-0

Bd. 47 SCHEKELMANN, A.: Materialflußsteuerung auf der Basis des Wissens mehrerer Experten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 47, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-46-9

Bd. 48 GECK-MÜGGE, K.: Herleitung und Spezifikation generischer Bausteine zur einheitlichen Modellierung von Fertigungsinformationen für die Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 48, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-47-7

Bd. 49 WALLASCHEK, J.; LÜCKEL, J.; LITTMANN, W.: Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control. 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 49, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-48-5

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 50 FINK, A.: Szenariogestützte Führung industrieller Produktionsunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 50, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-49-3

Bd. 51 HOLTKAMP, R.: Ein objektorientiertes Rahmenwerk zur Erstellung individueller, verteilter Fertigungslenkungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 51, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-50-7

Bd. 52 KUHN, A.: Referenzmodelle für Produktionsprozesse zur Untersuchung und Gestaltung von PPS-Aufgaben. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 52, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-51-5

Bd. 53 SIEBE, A.: Systematik der Umsetzung von IT-orientierten Veränderungsprojekten in dynamischen Umfeldern. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 53, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-52-3

Bd. 54 KLAHOLD, R. F.: Dimensionierung komplexer Produktionsnetzwerke. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 54, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-53-1

Bd. 55 SCHÜRHOLZ, A.: Synthese eines Modells zur simulationsgestützten Potentialanalyse der Distribution. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 55, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-54-X

Bd. 56 GEHNEN, G.: Integriertes Netzwerk zur Fertigungssteuerung und –automatisierung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 56, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-55-8

Bd. 57 KRESS, S.: Architektur eines workflowbasierten Planungsinstruments für die technische Auftragsbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Telearbeit. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 57, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-56-6

Bd. 58 THIELEMANN, F.: Integrierte Methodik zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen mittels Workflowmanagement. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 58, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-57-4

Bd. 59 KROME, J.: Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statoren für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellen-Motoren. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 59, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-58-2

Bd. 60 DEMEL, W.; SCHMITZ , G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Krefelder Workshop TransMechatronik, 24. August 1999 Fachhochschule Niederrhein, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 60, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-59-0

Bd. 61 LANGEMANN, T.: Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 61, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-60-4

Bd. 62 KÜMMEL, M.: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 62, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-61-2

Bd. 63 LUKOVSZKI, T.: New Results on Geometric Spanners and Their Applications. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 63, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-62-0

Bd. 64 LÖFFLER, A.; MONDADA, F.; RÜCKERT, U. (Hrsg.): Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the 1st International Khepera Workshop. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 64, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-63-9

Bd. 65 SCHÄFERMEIER, U.; BISCHOFF, C.: KMUnet - Ein Konzept zur ablauforganisatorischen Gestaltung der Lieferanteneinbindung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 65, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-64-7

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 66 HOLTHÖFER, N.: Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 66, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8

Bd. 67 SCHLAKE, O.: Verfahren zur kooperativen Szenario-Erstellung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 67, Paderborn, Band 2000 – ISBN 3-931466-66- 3

Bd. 68 LEWANDOWSKI, A.: Methode zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 68, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-67-1

Bd. 69 SCHMIDTMANN, A.: Eine Spezifikationssprache für die Fertigungslenkung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 69, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-68-X

Bd. 70 GROBBEL, R.: Eine Referenzarchitektur für Kooperationsbörsen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 70, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8

Bd. 71 WESSEL, R.: Modelocked Waveguide Lasers in Lithium Niobate. Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 71, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-70-1

Bd. 72 LÖFFLER, A.: Energetische Modellierung neuronaler Signalverarbeitung. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 72, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931433-71-X

Bd. 73 LUDWIG, L. A.: Computational Intelligence in der Produktionswirtschaft. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 73, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-72-8

Bd. 74 WENSKI, R.: Eine objektorientierte Systemkomponente zur Workflow-Modellierung und -Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Telekooperation. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 74, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-73-6

Bd. 75 GRASMANN, M.: Produktkonfiguration auf Basis von Engineering Data Management-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 75, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-74-4

Bd. 76 DITZE, C.: Towards Operating System Synthesis. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 76, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-75-2

Bd. 77 KÖRNER, T.: Analog VLSI Implementation of a Local Cluster Neural Network. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 77, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-76-0

Bd. 78 SCHEIDELER, C.: Probabilistic Methods for Coordination Problems. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 78, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-77-9

Bd. 79 GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-78-7

Bd. 80 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-79-5

Bd. 81 RIEPING, I.: Communication in Parallel Systems-Models, Algorithms and Implementations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 81, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-80-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 82 GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J.: Auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. 4. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 82, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-81-7

Bd. 83 DEL CASTILLO, G.: The ASM Workbench - A Tool Environment for Computer-Aided Analysis and Validation of Abstract State Machine Models. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 83, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-82-5

Bd. 84 SCHÄFERMEIER, U.: Eine Methode zur systemorientierten organisatorischen Gestaltung der Zweckaufgabenverrichtung in kooperativen Verbünden; Klassifikation, Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 84, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-83-3

Bd. 85 KRÜGER, J.: Ganzheitliche Beherrschung von Abläufen in und zwischen soziotechnischen Systemen: Ein Beitrag zur Modellbildung und zum paradigmatischen Verständnis von Industrieunternehmen zur Integration von Mensch und Maschine; Prozess und Struktur. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 85, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-84-1

Bd. 86 BARTSCHER, T.: Methoden des Integrierten Workflowmanagements (IWFM). Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 86, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-85-X

Bd. 87 QUINTANILLA, J.: Ein Verifikationsansatz für eine netzbasierte Modellierungsmethode für Fertigungssteuerungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 87, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-86-8

Bd. 88 PREIS, R.: Analyses and Design of Efficient Graph Partitioning Methods. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 88, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-87-6

Bd. 89 nicht erschienen!

Bd. 90 WESTERMANN, M.: Caching in Networks: Non-Uniform Algorithms and Memory Capacity Constraints. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 90, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-89-2

Bd. 91 LEMKE, J.: Nutzenorientierte Planung des Einsatzes von CAD- / CAE-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 91, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-00-X

Bd. 92 VON BOHUSZEWICZ, O.: Eine Methode zur Visualisierung von Geschäftsprozessen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 92, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-01-8

Bd. 93 BÖRNCHEN, T.: Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 93, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-02-6

Bd. 94 WINDELER, I.: Auswahl von Restrukturierungsprojekten in Forschungs- und Entwicklungsorganisationen der Automobilindustrie. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 94, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-03-4

Bd. 95 WOLFF, C.: Parallele Simulation großer pulscodierter neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 95, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-04-2

Bd. 96 HENKE, A.: Modellierung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 96, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-05-0

Bd. 97 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U. (Hrsg.): Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMiRE2001. 5. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 97, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-06-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 98 LI, P.: Datenkonversion für den Datenaustausch in verteilten Fertigungs-Lenkungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 98, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-07-7

Bd. 99 BRANDT, C.: Eine modellbasierte Methode zum strukturierten Entwurf virtueller Umgebungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 99, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-08-5

Bd. 100 WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung maschinenbaulicher Anlagen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 100, Paderborn, 2001 – ISBN-3-935433-09-3

Bd. 101 HEMSEL, T.: Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 101, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-10-7

Bd. 102 MAUERMANN, H.: Leitfaden zur Erhöhung der Logistikqualität durch Analyse und Neugestaltung der Versorgungsketten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 102, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-11-5

Bd. 103 WAGENBLAßT, D.: Eine Analysemethode zur Beurteilung der Funktionssicherheit von gemischt analog-digitalen Schaltungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 103, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-12-3

Bd. 104 PORRMANN, M.: Leistungsbewertung eingebetteter Neurocomputersysteme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 104, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-13-1

Bd. 105 SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Electronic Business in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 105, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-14-X

Bd. 106 SOETEBEER, M.: Methode zur Modellierung, Kontrolle und Steuerung von Produktstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 106, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-15-8

Bd. 107 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 107, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-16-6

Bd. 108 FLATH, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 108, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-17-4

Bd. 109 AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 109, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-18-2

Bd. 110 HELMKE, S.: Eine simulationsgegestützte Methode für Budgetentscheidungen im Kundenbindungsmanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 110, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-19-0

Bd. 111 CZUBAYKO, R.: Rechnerinterne Repräsentation von informationsverarbeitenden Lösungselementen für die verteilte kooperative Produktentwicklung in der Mechatronik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 111, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-20-4

Bd. 112 GOLDSCHMIDT, S.: Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 112, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-21-2

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 113 LEHMANN, T.: Towards Device Driver Synthesis. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 113, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-22-0

Bd. 114 HÄRTEL, W.: Issueorientierte Frühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 114, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-23-9

Bd. 115 ZIEGLER, M.: Zur Berechenbarkeit reeller geometrischer Probleme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 115, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-24-7

Bd. 116 SCHMIDT, M.: Neuronale Assoziativspeicher im Information Retrieval. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 116, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-25-5

Bd. 117 EL-KEBBE, D. A.: Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 117, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-26-3

Bd. 118 PUSCH, R.: Personalplanung und -entwicklung in einem integrierten Vorgehensmodell zur Einführung von PDM-Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 118, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-27-1

Bd. 119 SOHLER, C.: Property Testing and Geometry. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 119, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-28-X

Bd. 120 KESPOHL, H.: Dynamisches Matching – Ein agentenbasiertes Verfahren zur Unterstützung des Kooperativen Produktengineering durch Wissens- und Technologietransfer. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 120, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-29-8

Bd. 121 MOLT, T.: Eine domänenübergreifende Softwarespezifikationstechnik für automatisierte Fertigungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 121, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-30-1

Bd. 122 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 122, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-31-X

Bd. 123 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 123, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-32-8

Bd. 124 LITTMANN, W.: Piezoelektrische resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 124, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-33-6

Bd. 125 WICKORD, W.: Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den frühen Phasen des Systementwurfs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 125, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-34-4

Bd. 126 HEITTMANN, A.: Ressourceneffiziente Architekturen neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 126, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-35-2

Bd. 127 WITKOWSKI, U.: Einbettung selbstorganisierender Karten in autonome Miniroboter. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 127, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-36-0

Bd. 128 BOBDA, C.: Synthesis of Dataflow Graphs for Reconfigurable Systems using Temporal Partitioning and Temporal Placement. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 128, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-37-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 129 HELLER, F.: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 129, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-38-7

Bd. 130 KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 130, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-39-5

Bd. 131 KEIL-SLAWIK, R.; BRENNECKE, A.; HOHENHAUS, M.: ISIS -Installationshandbuch für lernförderliche Infrastrukturen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 131, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-40-9

Bd. 132 OULD HAMADY, M.: Ein Ansatz zur Gestaltung des operativen Fertigungsmanagements innerhalb der Lieferkette. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 132, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-41-7

Bd. 133 HOLTZ, C.: Theoretical Analysis of Unsupervised On-line Learning through Soft Competition. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 133, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-42-5

Bd. 134 UEBEL, M.: Ein Modell zur Steuerung der Kundenbearbeitung im Rahmen des Vertriebsmanagements. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 134, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-43-3

Bd. 135 BRINKMANN, A.: Verteilte Algorithmen zur Datenplazierung und zum Routing in gegnerischen Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 135, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-44-1

Bd. 136 FRÜND, E.: Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 136, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-45-X

Bd. 137 KEIL-SLAWIK, R. (Hrsg.): Digitale Medien in der Hochschule: Infrastrukturen im Wandel. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 137, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-46-8

Bd. 138 STORCK, H.: Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wanderwellenmotoren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 138, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-47-6

Bd. 139 KALTE, H.: Einbettung dynamisch rekonfigurierbarer Hardwarearchitekturen in eine Universalprozessorumgebung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 139, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-48-4

Bd. 140 ISKE, B.: Modellierung und effiziente Nutzung aktiver Infrarotsensorik in autonomen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 140, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-49-2

Bd. 141 BÄTZEL, D.: Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 141, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-50-6

Bd. 142 BÖKE, C.: Automatic Configuration of Real-Time Operating Systems and Real-Time Communication Systems for Distributed Embedded Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 142, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-51-4

Bd. 143 KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 143, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-52-2

Bd. 144 HENZLER, S: Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 144, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-53-0

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 145 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 145, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-54-9

Bd. 146 LESSING, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 146, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-55-7

Bd. 147 HAMOUDIA, H.: Planerische Ablaufgestaltung bei prozessorientierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 147, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-56-5

Bd. 148 BUSCH, A.: Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung – ein verhandlungsbasierter Ansatz zur interorganisationalen Koordination bei Störungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 148, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-57-3

Bd. 149 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 149, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-58-1

Bd.150 MEYER, B.: Value-Adding Logistics for a World Assembly Line. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 150, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-59-X

Bd. 151 GRIENITZ, V.: Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 151, Paderborn, 2004 – ISBN 3-9354 33-60-3

Bd. 152 FRANKE, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 152, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-61-1

Bd. 153 SALZWEDEL, K. A.: Data Distribution Algorithms for Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 153, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-62-X

Bd. 154 RÄCKE, H.: Data Management and Routing in General Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 154, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-63-8

Bd. 155 FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-64-6

Bd. 156 MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-65-4

Bd. 157 FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttle-System. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 157, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-66-2

Bd. 158 GAJEWSKI, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business. Dissertation Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 158, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-67-0

Bd. 159 RÜTHER, M.: Ein Beitrag zur klassifizierenden Modularisierung von Verfahren für die Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 159, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-68-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 160 MUECK, B.: Eine Methode zur benutzerstimulierten detaillierungsvarianten Berechnung von diskreten Simulationen von Materialflüssen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, , Band 160, Paderborn 2004 – ISBN 3-935433-69-7

Bd. 161 LANGEN, D.: Abschätzung des Ressourcenbedarfs von hochintegrierten mikroelektronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 161, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-70-0

Bd. 162 ORLIK, L.: Wissensbasierte Entscheidungshilfe für die strategische Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 162, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-71-9

Bd. 163 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 163, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-72-7

Bd. 164 FISCHER, M.: Design, Analysis, and Evaluation of a Data Structure for Distributed Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 164, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-73-5

Bd. 165 MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion - Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 165, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-74-3

Bd. 166 JANIA, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 166, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-75-1

Bd. 167 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-76-X

Bd. 168 VOLBERT, K.: Geometric Spanners for Topology Control in Wireless Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 168, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-77-8

Bd. 169 ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraumes. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-78-6

Bd. 170 EMMRICH, A.: Ein Beitrag zur systematischen Entwicklung produktorientierter Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 170, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-79-4

Bd. 171 NOWACZYK, O.: Explorationen: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 171, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-80-8

Bd. 172 MAHMOUD, K.: Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 172, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-81-6

Bd. 173 KLIEWER, G.: Optimierung in der Flugplanung: Netzwerkentwurf und Flottenzuweisung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 173, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-82-4

Bd. 174 BALÁŽOVÁ, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 174, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-83-2

Bd. 175 FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-84-0

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 176 BERGER, T.: Methode zur Entwicklung und Bewertung innovativer Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 176, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-85-9

Bd. 177 BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive - Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 177, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-86-7

Bd. 178 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 1. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 3. und 4. November 2005, Schloß Neuhardenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 178, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-87-5

Bd. 179 FU, B.: Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 179, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-88-3

Bd. 180 WALLASCHEK, J.; HEMSEL, T.; MRACEK, M.: Proceedings of the 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 180, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-89-1

Bd. 181 MEYER AUF DER HEIDE, F.; MONIEN, B. (Hrsg.): New Trends in Parallel & Distributed Computing. 6. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 17. und 18. Januar 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 181, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-00-1

Bd. 182 HEIDENREICH, J.: Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktionsnetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 182, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-01-X

Bd. 183 PAPE, U.: Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 183, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-02-8

Bd. 184 BINGER, V.: Konzeption eines wissensbasierten Instruments für die strategische Vorausschau im Kontext der Szenariotechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 184, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-03-6

Bd. 185 KRIESEL, C.: Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung – Strategische Standort- und Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 185, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-04-4

Bd. 186 KLEIN, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 186, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-05-2

Bd. 187 WORTMANN, R.: Methodische Entwicklung von Echtzeit 3D-Anwendungen für Schulung und Präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 187, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-06-0

Bd. 188 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 188, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-07-9

Bd. 189 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 189, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-08-7

Bd. 190 DAMEROW, V.: Average and Smoothed Complexity of Geometric Structures. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 190, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-09-5

Bd. 191 GIESE, H.; NIGGEMANN, O. (Hrsg.): Postworkshop Proceedings of the 3rd Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER 3), HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 191, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-10-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 192 RADKOWSKI, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 192, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-11-7

Bd. 193 SHEN, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 193, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-12-5

Bd. 194 REDENIUS, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 194, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-13-3

Bd. 195 KUHL, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 195, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-14-1

Bd. 196 MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-15-X

Bd. 197 RIPS, S.: Adaptive Steuerung der Lastverteilung datenparalleler Anwendungen in Grid-Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 197, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-16-8

Bd. 198 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 2. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 9. und 10. November 2006, Schloß Neuhardenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 198, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-17-6

Bd. 199 FRANKE, W.: Wiederverwendungsorientierte Herleitung von Inter-Fachkomponentenkonzepten für Lagerverwaltungssoftwaresysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 199, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-18-7

Bd. 200 SCHEIDELER, P.: Ein Beitrag zur erfahrungsbasierten Selbstoptimierung einer Menge technisch homogener fahrerloser Fahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 200, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-19-4

Bd. 201 KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 201, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-20-0

Bd. 202 HALFMEIER, S.: Modellierung und Regelung von Halbtoroidvariationen in leistungsverzweigten Getriebestrukturen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 202, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-21-7

Bd. 203 RÜHRUP, S.: Position-based Routing Strategies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 203, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-22-4

Bd. 204 SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 204, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-23-1

Bd. 205 IHMOR, S.: Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 205, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-24-8

Bd. 206 ECKES, R.: Augmented Reality – basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 206, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-25-5

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 207 STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-26-2

Bd. 208 LAROQUE, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 208, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-27-9

Bd. 209 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 209, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-28-6

Bd. 210 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 210, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-29-3

Bd. 211 KAUSCHKE, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 211, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-30-9

Bd. 212 DU, J.: Zellen-basierte Dienst-Entdeckung für Roboternetzwerke. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 212, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-31-6

Bd. 213 DANNE, K.: Real-Time Multitasking in Embedded Systems Based on Reconfigurable Hardware. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 213, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-32-3

Bd. 214 EICKHOFF, R.: Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 214, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-33-0

Bd. 215 KÖSTER, M.: Analyse und Entwurf von Methoden zur Ressourcenverwaltung partiell rekonfigurierbarer Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 215, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-34-7

Bd. 216 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U.: Proceedings of the 4th International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment – AMiRE2007. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 216, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-35-4

Bd. 217 PHAM VAN, T.: Proactive Ad Hoc Devices for Relaying Real-Time Video Packets. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 217, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-36-1

Bd. 218 VIENENKÖTTER, A.: Methodik zur Entwicklung von Innovations- und Technologie-Roadmaps. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 218, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-37-8

Bd. 219 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. November 2007, Miele & Cie. KG Gütersloh, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 219, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-38-5

Bd. 220 FRÜND, J.: Eine Architekturkonzeption für eine skalierbare mobile Augmented Reality Anwendung für die Produktpräsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 220, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-39-2

Bd. 221 PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 221, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-40-8

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 222 MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): The European Integrated Project “Dynamically Evolving, Large Scale Information Systems (DELIS)”, Proceedings of the Final Workshop, Barcelona, February 27-28, 2008, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 222, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-41-5

Bd. 223 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Self-optimizing Mechatronic Systems: Design the Future. 7. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 20. und 21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 223, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2

Bd. 224 RATH, M.: Methode zur Entwicklung hybrider Technologie- und Innovationsstrategien – am Beispiel des Automobils. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 224, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-43-9

Bd. 225 GRÜNEWALD, M.: Protokollverarbeitung mit integrierten Multiprozessoren in drahtlosen Ad-hoc-Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 225, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-44-6

Bd. 226 STRAUSS, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 226, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-45-3

Bd. 227 ZEIDLER, C.: Systematik der Materialflussplanung in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 227, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-46-0

Bd. 228 PARISI, S.: A Method for the intelligent Authoring of 3D Animations for Training and Maintenance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 228, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-47-7

Bd. 229 DITTMANN, F.: Methods to Exploit Reconfigurable Fabrics. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 229, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-48-4

Bd. 230 TONIGOLD, C.: Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 230, Paderborn, 2008– ISBN 978-3-939350-49-1

Bd. 231 BRANDT, T.: A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 231, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-50-7

Bd. 232 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-51-4

Bd. 233 CHANG, H.: A Methodology for the Identification of Technology Indicators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 233, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-52-1

Bd. 234 ADELT, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; TSCHEUSCHNER, T.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-53-8

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 235 DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-54-5

Bd. 236 GEHRKE, M.; GIESE, H.; STROOP J.: Proceedings of the 4th Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER4), Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 236, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-55-2

Bd. 237 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 4. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 30. und 31. Oktober 2008, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 237, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-56-9

Bd. 238 BRÖKELMANN, M.: Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 238, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-57-6

Bd. 239 KETTELHOIT, B.: Architektur und Entwurf dynamisch rekonfigurierbarer FPGA-Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 239, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-58-3

Bd. 240 ZAMBALDI, M.: Concepts for the development of a generic Multi-Level Test Bench covering different areas of applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 240, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-59-0

Bd. 241 OBERSCHELP, O.: Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 241, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-60-6

Bd. 242 STOLLT, G.: Verfahren zur strukturierten Vorausschau in globalen Umfeldern produzierender Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 242, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-61-3

Bd. 243 WENZELMANN, C.: Methode zur zukunftsorientierten Entwicklung und Umsetzung von Strategieoptionen unter Berücksichtigung des antizipierten Wettbewerbsverhaltens. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 243, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-62-0

Bd. 244 BRÜSEKE, U.: Einsatz der Bibliometrie für das Technologiemanagement. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 244, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-63-7

Bd. 245 TIMM, T.: Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 245, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-64-4

Bd. 246 GRIESE, B.: Adaptive Echtzeitkommunikationsnetze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 246, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-65-1

Bd. 247 NIEMANN, J.-C.: Ressourceneffiziente Schaltungstechnik eingebetteter Parallelrechner. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 247, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-66-8

Bd. 248 KAISER, I.: Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 248, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-67-5

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 249 GANS, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 249, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-68-2

Bd. 250 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-69-9

Bd. 251 LESSMANN, J.: Protocols for Telephone Communications in Wireless Multi-Hop Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 251, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-70-5

Bd. 252 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 252, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-71-2

Bd. 253 KLÖPPER, B.: Ein Beitrag zur Verhaltensplanung für interagierende intelligente mechatronische Systeme in nicht-deterministischen Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 253, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-72-9

Bd. 254 LOW, C. Y.: A Methodology to Manage the Transition from the Principle Solution towards the Controller Design of Advanced Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 254, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-73-6

Bd. 255 XU, F.: Resource-Efficient Multi-Antenna Designs for Mobile Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 255, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-74-3

Bd. 256 MÜLLER, T.: Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 256, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-75-0

Bd. 257 BONORDEN, O.: Versatility of Bulk Synchronous Parallel Computing: From the Heterogeneous Cluster to the System on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 257, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-76-7

Bd. 258 KORTENJAN, M.: Size Equivalent Cluster Trees - Rendering CAD Models in Industrial Scenes. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 258, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-77-4

Bd. 259 SCHOMAKER, G.: Distributed Resource Allocation and Management in Heterogeneous Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 259, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-78-1

Bd. 260 MENSE, M.: On Fault-Tolerant Data Placement in Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 260, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-79-8

Bd. 261 LÜRWER-BRÜGGEMEIER, K.: Mächtigkeit und Komplexität von Berechnungen mit der ganzzahligen Division. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 261, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-80-4

Bd. 262 ALTEMEIER, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 262, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-81-1

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 263 MAHAJAN, K.: A combined simulation and optimization based method for predictive-reactive scheduling of flexible production systems subject to execution exceptions. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 263, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-82-8

Bd. 264 CHRISTIANSEN, S. K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 264, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-83-5

Bd. 265 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 5. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 19. und 20. November 2009, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 265, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-84-2

Bd. 266 KAULMANN,T.: Ressourceneffiziente Realisierung Pulscodierter Neuronaler Netze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 266, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-85-9

Bd. 267 WEHRMEISTER, M. A.: An Aspect-Oriented Model-Driven Engineering Approach for Distributed Embedded Real-Time Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 267, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-86-6

Bd. 268 DANNE, C.: Assessing the Cost of Assortment Complexity in Consumer Goods Supply Chains by Reconfiguration of Inventory and Production Planning Parameters in Response to Assortment Changes. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 268, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-87-3

Bd. 269 AUFENANGER, M.: Situativ trainierte Regeln zur Ablaufsteuerung in Fertigungssystemen und ihre Integration in Simulationssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 269, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-88-0

Bd. 270 STOLL, K.: Planung und Konzipierung von Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 270, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-89-7

Bd. 271 IHMELS, S.: Verfahren zur integrierten informationstechnischen Unterstützung des Innovationsmanagements. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 271, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-90-3

Bd. 272 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-91-0

Bd. 273 PURNAPRAJNA,M.: Run-time Reconfigurable Multiprocessors. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 273, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-92-7

Bd. 274 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-93-4

Bd. 275 WEDMAN, S.: Lebensdauerüberwachung in mechatronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 275, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-94-1

Bd. 276 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 28. und 29. Oktober 2010, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 276, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-95-8

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 277 HUBER, D.: Geregelte Vereinfachung hierarchischer Partitionen von Modellen in der Materialflusssimulation. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 277, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-96-5

Bd. 278 DEGENER, B.: Local, distributed approximation algorithms for geometric assignment problems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 278, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-97-2

Bd. 279 WARKENTIN, A.: Systematik zur funktionsorientierten Modellierung von Elektrik/ Elektronik-Systemen über den Produktlebenszyklus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 279, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-98-9

Bd. 280 BRINK, V.: Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 280, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-99-6

Bd. 281 SAMARA, S.: Adaptable OS Services for Distributed Reconfigurable Systems on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 281, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-00-7

Bd. 282 BIENKOWSKI, M.: Page migration in dynamic networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 282, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-01-4

Bd. 283 MAHLMANN, P.: Peer-to-peer networks based on random graphs. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 283, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-02-1

Bd. 284 DYNIA, M.: Collective graph exploration. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 284, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-03-8

Bd. 285 POHL,C.: Konfigurierbare Hardwarebeschleuniger für selbst-organisierende Karten. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 285, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-04-5

Bd. 286 DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-05-2

Bd. 287 MEHLER, J.: Power-Aware Online File Allocation in Dynamic Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 287, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-06-9

Bd. 288 HARCHENKO, J.: Mechatronischer Entwurf eines neuartigen aktiven Fahrzeugfederungssystems für PKW unter Verwendung einer reversierbaren Flügelzellenpumpe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 288, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-07-6

Bd. 289 KORZENIOWSKI, M.: Dynamic Load Balancing in Peer-to-Peer Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 289, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-08-3

Bd. 290 FRAHLING, G.: Algorithms for Dynamic Geometric Data Streams. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 290, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-09-0

Bd. 291 REYES PÉREZ, M.: A Specification Technique for the Conceptual Design of Manufacturing Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 291, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-10-6

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 292 STEHR,J.: On the design and implementation of reliable and economical telematics software architectures for embedded systems: a domain-specific framework. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 292, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-11-3

Bd. 293 KRÓL,R.: Eine Reduktionsmethode zur Ableitung elektromechanischer Ersatzmodelle für piezoelektrische Wandler unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 293, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-12-0

Bd. 294 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-13-7

Bd. 295 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 295, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-14-4

Bd. 296 POOK, S.: Eine Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 296, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-15-1

Bd. 297 MRACEK,M.: Untersuchung des dynamischen Verhaltens gekoppelter piezoelektrischer Ultraschallmotoren mit Stoßkontakt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 297, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-16-8

Bd. 298 GEHWEILER, J.: Peer-to-Peer Based Parallel Web Computing. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 298, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-17-5

Bd. 299 BRUNS, T.: Trajektorienplanung mittels Diskretisierung und kombinatorischer Optimierung am Beispiel des autonomen Kreuzungsmanagements für Kraftfahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 299, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-18-2

Bd. 300 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 7. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 24. und 25. November 2011, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 300, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-19-9

Bd. 301 SALFELD, M.: Konzeption eines Regelungssystems zur gezielten Beeinflussung der Fahrdynamik in Unfallsituationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 301, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-20-5

Bd. 302 KEMPKES, B.: Local Strategies for Robot Formation Problems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 302, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-21-2

Bd. 303 DELIUS, R.: Sicherstellen der Abrufe bei Automotive-Zulieferern mit minimalen Kosten unter besonderer Berücksichtigung von Liquiditäts-, Beschäftigungs-, Knowhow- und IT-Restriktionen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 303, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-22-9

Bd. 304 NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-23-6

Bd. 305 KREFT, S.: Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 305, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-24-3

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

Bd. 306 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 8. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 6. und 7. Dezember 2012, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 306, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-25-0

Bd. 307 REYMANN, F.: Verfahren zur Strategieentwicklung und -umsetzung auf Basis einer Retropolation von Zukunftsszenarien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 307, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-26-7

Bd. 308 KAHL, S.: Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 308, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-27-4

Bd. 309 WASSMANN, H.: Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 309, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-28-1

Bd. 310 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-29-8

Bd. 311 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 311, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-30-4

Bd. 312 BENSIEK, T.: Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 312, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-31-1

Bd. 313 KOKOSCHKA, M.: Verfahren zur Konzipierung imitationsgeschützter Produkte und Produktionssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 313, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-32-8

Bd. 314 VON DETTEN, M.: Reengineering of Component-Based Software Systems in the Presence of Design Deficiencies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 314, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-33-5

Bd. 315 MONTEALEGRE AGRAMONT, N. A.: Immunorepairing of Hardware Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 315, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-34-2

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Das Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn veranstaltet 2013 die 15. ASIM Fachtagung zum Thema Simulation in Produktion und Logistik. Vom 9. bis 11. Oktober 2013 widmet sich die Tagung der Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung von Produktions- und Logistiksystemen. Wie bei den vorangegangenen ASIM-Fachtagungen sollen gleichermaßen Forschung, Entwicklung und industrielle Nutzung der Simulation diskutiert werden. Somit erhalten Teilnehmer/innen ohne Simulationserfahrung einen Überblick über Möglichkeiten und Grenzen der Simulation, während erfahrene Anwender die Tagung zum Erfahrungsaustausch nutzen und neue Angebote der zahlreichen Aussteller aus dem Umfeld der Simulation begutachten können.

Themen der Fachtagung

Theorie und Methoden der Simulationstechnik • Neue Simulationsverfahren und -systeme • Simulation und Visualisierung • Simulation, Optimierung und Versuchsplanung • Fertigungs- und Materialflusstechnik • Digitale Fabrik • Instandhaltung und Qualitätssicherung • Dienstleistung und hybride Produktion • Arbeitsorganisation und Personaleinsatz • Logistiksysteme • Produktionsnetzwerke und verteilte Systeme • Spezielle Simulationsanwendungen (Automobilindustrie, Unikatfertigung usw.) • Beschaffungs- und Distributionsnetzwerke

Organisiert und ausgerichtet wird die Tagung von **der Fachgruppe Wirtschaftsinformatik, insb. CIM des Heinz Nixdorf Instituts der Universität Paderborn.**

ISBN 978-3-942647-35-9

ASIM-Mitteilung Nr. AM 147