

Sigrid Wenzel & Tim Peter (Hrsg.)

SIMULATION

IN PRODUKTION UND LOGISTIK

2017



17. Fachtagung Kassel, 20.–22. September 2017

kassel
university



press

Sigrid Wenzel & Tim Peter (Hrsg.)

Simulation in Produktion und Logistik 2017

Kassel, 20.-22. September 2017



kassel
university



press

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel

Universität Kassel

Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung

Kurt-Wolters-Straße 3

34125 Kassel

sekretariat-pfp@uni-kassel.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-7376-0192-4 (print)

ISBN 978-3-7376-0193-1 (e-book)

DOI: <http://dx.medra.org/10.19211/KUP9783737601931>

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-401934>

© 2017, kassel university press GmbH, Kassel

www.upress.uni-kassel.de

Vorwort

Die Simulation ist als Problemlösungsmethode bei der Planung und dem Betrieb von Produktions- und Logistikanlagen seit Jahren etabliert. Das Simulationswerkzeug ist zum wichtigen Bestandteil der digitalen Planung und Entscheidungsunterstützung in Unternehmen geworden. Aufgrund der Komplexität der Planungs- und Betriebsführungsaufgaben sowie der Vernetzung der Unternehmen beantwortet die Simulation eine Vielzahl an Fragestellungen im Bereich der unternehmensinternen Produktions- und Logistikplanung und unterstützt die Gestaltung von Logistiknetzen sowie Distributions- und Beschaffungsstrukturen in diversen Branchen. Ein relativ neues Einsatzfeld für die Simulation in Produktion und Logistik ist die Betrachtung energetischer Faktoren. Darüber hinaus streben Arbeiten im Kontext Industrie 4.0 methodische und technologische Weiterentwicklungen in Bezug auf Integration, Vernetzung und Performanz an.

Die 17. ASIM-Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ wird von der gleichnamigen Fachgruppe in der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) der Gesellschaft für Informatik (GI) e. V. vom 20. bis 22. September 2017 in Kassel veranstaltet. Sie greift die aktuellen Entwicklungstrends in Wissenschaft und Industrie in drei Plenarvorträgen und 53 Beiträgen auf und diskutiert theoretische Konzepte und methodische Weiterentwicklungen zur Simulation. Dabei wird auf die Vernetzung von Simulation und Optimierung, aber auch auf die Nutzung der Daten im Kontext der Simulation eingegangen. Im Fokus stehen des Weiteren die Analyse des Einflusses energetischer Faktoren in der Simulation in Produktion und Logistik, die Betrachtung des Personals, die Gestaltung von Produktions- und Logistiksystemen und unternehmensübergreifenden Netzwerken sowie die simulationsbasierte Betriebsunterstützung. Die industriellen Einsatzfelder werden insbesondere über Anwendungen in der Automobilindustrie sowie unterschiedliche Fallbeispiele diskutiert; hier werden auch Fragen der monetären Bewertung angesprochen. Als spezielles Anwendungsfeld wird die Simulation in Lehre und Ausbildung adressiert. Insgesamt ist damit ein facettenreiches Tagungsprogramm mit vielen interessanten Beiträgen entstanden.

An dieser Stelle danken wir als Herausgeber des Buches allen Mitgliedern des Programmkomitees für die konstruktive Begutachtung der Exposés und Langfassungen sowie für die Mitgestaltung und Moderation der Sitzungen. Unser besonderer Dank gilt allen Referentinnen und Referenten, die mit ihren Vorträgen und Tutorials wesentlich zum Gelingen der Tagung beitragen. Darüber hinaus möchten wir auch allen Institutionen danken, die organisatorisch, materiell oder finanziell die Tagung unterstützen.

Allen Teilnehmern der 17. ASIM-Fachtagung wünschen wir interessante Fachvorträge, anregende Diskussionen und viele Hinweise und neue Ideen bei der Lektüre dieses Tagungsbandes.

Kassel, im September 2017
Sigrid Wenzel und Tim Peter

Foreword

Simulation has been established as a problem solving method for the planning and operation of production and logistics facilities for years. The simulation tool has become an important component of digital planning and decision support in companies. Due to the complexity of planning and management tasks, as well as networking of companies, simulation gives answers to a variety of questions about intra-company production and logistics planning. Furthermore, it supports the designing of logistics networks, distribution and procurement structures in various industries. A relatively new field of application for simulation in production and logistics is the consideration of energetic aspects. In addition, developments in the context of industry 4.0 are aimed at methodological and technological developments with regard to integration, networking and performance.

The 17th ASIM Dedicated Conference on “Simulation in Production and Logistics” is organized by the section of the same name in the ASIM (“Arbeitsgemeinschaft Simulation”) of the GI e. V. (“Gesellschaft für Informatik”) and takes place in Kassel from the 20th to the 22nd of September 2017. In 3 keynote speeches and 53 contributions current development trends in science and manufacturing are a subject of discussion. Theoretical concepts and methodological improvements in simulation are discussed, as well as combining simulation and optimization and using data in the context of simulation. Furthermore, the focus is on analysing the influence of energetic aspects in simulation in production and logistics, modelling of employees, designing of production and logistics systems and networks among companies, as well as simulation-based supporting of operating. The industrial fields of application are discussed in particular in applications in the automotive industry as well as in various case studies. Questions of monetary valuation are also addressed, as well as simulation in education and training as a specific field of application. The result is a multi-faceted conference program with many interesting contributions.

At this point, we as the editors of the book would like to thank all members of the conference committee for their constructive review of the exposés and final papers, as well as for shaping and moderating the sessions. Our special thanks go to all speakers, who significantly contribute to the conference’s success with their presentations and tutorials. Furthermore, we would like to thank all institutions supporting the conference in an organizational, material or financial way.

We wish all participants of the 17th ASIM Dedicated Conference interesting lectures, inspiring discussions and many indications and new ideas by attending the speeches and reading the conference transcript.

Kassel, September 2017
Sigrid Wenzel and Tim Peter

Die ASIM Fachtagung „Simulation in Produktion und Logistik“ ist eine 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 164.

Conference Committee

Chairwoman: Sigrid Wenzel, Universität Kassel (Kassel, Germany)

Hans-Peter Barbey, FH Bielefeld (Germany)	Lothar März, STREMLER AG (Lindau, Germany)
Hans-Joachim Bargstädt, Bauhaus-Universität Weimar (Germany)	Gottfried Mayer, BMW Group (München, Germany)
Jochen Bernhard, SSI Schäfer Noell GmbH (Dortmund, Germany)	Charles Møller, Aalborg University (Denmark)
Mathias Bös, SDZ (Dortmund, Germany)	Harald Mutzke, Simulation Expert Service (Nürnberg, Germany)
Uwe Bracht, TU Clausthal-Zellerfeld (Germany)	Stefan Nickel, Karlsruher Institut für Technologie (Germany)
Thorsten Claus, IHI Zittau (Germany)	Bernd Noche, Universität Duisburg-Essen (Germany)
Uwe Clausen, TU Dortmund (Germany)	Holger Pitsch, INCONTROL Simulation Solutions (Wiesbaden, Germany)
Wilhelm Dangelmaier, Heinz Nixdorf Institut (Paderborn, Germany)	Carsten Pöge, Volkswagen AG (Wolfsburg, Germany)
John W. Fowler, Arizona State University (Tempe, Arizona, USA)	Markus Rabe, TU Dortmund (Germany)
Volkhard Franz, Universität Kassel (Germany)	Andreas Rinkel, Hochschule Rapperswil (Switzerland)
Matthias Heinicke, Siemens Industry Software GmbH & Co. KG (Stuttgart, Germany)	Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München (Germany)
Frank Herrmann, Hochschule Regensburg für angewandte Wissenschaften (Germany)	Andreas Schlegel, Fraunhofer IWU Chemnitz (Germany)
Jens Hesselbach, Universität Kassel (Germany)	Monika Schneider, Eisenmann AG (Holzgerlingen, Germany)
János Jósvai, Szèchenyi Istvan University (Győr, Hungary)	Thomas Schulze, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Germany)
Angel A. Juan, Open University of Catalonia (Barcelona, Spain)	Anders Skoogh, Chalmers University of Technology (Gothenburg, Sweden)
Alexander Klaas, Miebach Consulting GmbH (Frankfurt am Main, Germany)	Sven Spieckermann, SimPlan AG (Hanau, Germany)
Markus Klug, SSI Schäfer IT Solutions GmbH (Graz, Austria)	Dirk Steinhauer, SimPlan AG (Bremen, Germany)
Markus König, Ruhr-Universität Bochum (Germany)	Patricia Stock, REFA-Institut e.V. (Dortmund, Germany)
Christoph Laroque, Westsächsische Hochschule Zwickau (Germany)	Steffen Straßburger, TU Ilmenau (Germany)
Peter Lendermann, D-SIMLAB Technologies (Singapore)	Markus Vorderwinkler, PROFACOR GmbH (Steyr-Gleink, Austria)
Giacomo Liotta, Aalborg University (Denmark) †	Sigrid Wenzel, Universität Kassel (Germany)

Contents

HAUPTVORTRAG

KEYNOTE

Industrie 4.0 – Chance oder Risiko für die Ablaufsimulation <i>Mayer, Gottfried; Mieschner, Marielouise; BMW AG</i>	1
--	---

SIMULATION IN PRODUKTION UND LOGISTIK: EINFLUSS ENERGETISCHER FAKTOREN

SIMULATION IN PRODUCTION AND LOGISTICS: IMPACT OF ENERGETIC FACTORS

Betrachtungen energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik: Eine Literaturliteraturanalyse <i>Wenzel, Sigrid; Universität Kassel; Stoldt, Johannes; Fraunhofer IWU; Peter, Tim; Universität Kassel; Groß, Guido; Siemens Industry Software GmbH; Pitsch, Holger; INCONTROL Simulation Solutions; Rabe, Markus; TU Dortmund; Schlegel, Andreas; Fraunhofer IWU; Seewaldt, Marco; TU Clausthal</i>	9
Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell <i>Schlüter, Wolfgang; Henninger, Matthias; Buswell, Andreas; Schmidt, Jörg; Hochschule Ansbach</i>	19
Energieorientierte Betrachtung von Engpässen in Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation <i>Seewaldt, Marco; Bracht, Uwe; TU Clausthal</i>	29
Flexibilisierung der Energieversorgung am Beispiel der industriellen Hallenklimatisierung und Kälteerzeugung <i>Heidrich, Tobias; Dunkelberg, Heiko; Weiss, Tim; Hesselbach, Jens; Universität Kassel</i>	39
Modellierung von volatilen erneuerbaren Energieerzeugern und Energiespeichern in Siemens Plant Simulation <i>Stoldt, Johannes; Prell, Bastian; Schlegel, Andreas; Putz, Matthias; Fraunhofer IWU</i>	49
OptPlanEnergie – Der Einsatz von Simulation und Optimierung zur Verringerung des Energiebedarfs bei der Produktion von Sicherheitsglas <i>Baumann, Frank; Wilson, Heike; DUALIS GmbH IT Solution; Seidel, Stephan; Franke, Matthias; Fraunhofer IIS; Gromnütza, Ulrike; Bischoff Glastechnik GmbH</i>	59

Prädiktive simulationsgestützte Optimierung von Kältemaschinen im Verbund <i>Peesel, Ron-Hendrik; Schlosser, Florian; Schaumburg, Chris; Meschede, Henning;</i> <i>Universität Kassel</i>	69
Simulation des Energieverbrauchs von Maschinen in der Mischfutterproduktion zur Unterstützung bei Investitionsentscheidungen <i>Rippel, Daniel; Redecker, Marc Allan; Lütjen, Michael; Decker, André;</i> <i>Freitag, Michael; Thoben, Klaus-Dieter; Universität Bremen</i>	79
SIMULATION UND OPTIMIERUNG	
SIMULATION AND OPTIMIZATION	
A Two-phase Genetic Algorithm to Solve a Multi-objective Problem for Complex Assembly Lines <i>Zhou, Zhugen; Angelidis, Evangelos; Bohn, Daniel; Rose, Oliver;</i> <i>Universität der Bundeswehr München</i>	89
Design of Project-oriented Calculation Models for Job Priorities by Using a Customized Genetic Algorithm <i>Schmidt, Thorsten; Kühn, Mathias; Genßler, Paul Richard; TU Dresden</i>	99
Decision Support for Logistics Networks in Materials Trading Using a Simheuristic Framework and User-generated Action Types <i>Rabe, Markus; Dross, Felix; Schmitt, Dominik; Ammouriova, Majsa; TU Dortmund;</i> <i>Ipsen, Carola; thyssenkrupp Materials Services GmbH</i>	109
Comparing Different Distance Metrics for Calculating Distances in Urban Areas with a Supply Chain Simulation Tool <i>Rabe, Markus; Klüter, Astrid; Tietze, Simon; TU Dortmund</i>	119
A Simulation-Optimization Approach for the Two-Echelon Location Routing Problem Arising in the Creation of Urban Consolidation Centres <i>Gruler, Aljoscha; Universitat Oberta de Catalunya;</i> <i>Klüter, Astrid; Rabe, Markus; TU Dortmund;</i> <i>Juan, Angel A.; Universitat Oberta de Catalunya</i>	129
Simulation-based Optimization for a Supply Chain with Load Bundling Opportunity <i>Felberbauer, Thomas; FH St. Pölten;</i> <i>Peirleitner, Andreas Josef; Altendorfer, Klaus; FH Steyr</i>	139
A Location Model for Dynamic Vehicle Routing Problems <i>Mayer, Thomas; Uhlig, Tobias; Rose, Oliver;</i> <i>Universität der Bundeswehr München</i>	149
Analysis of Decentral Platoon Planning Possibilities in Road Freight Transportation Using an Agent-based Simulation Model <i>Elbert, Ralf; Knigge, Jan-Karl; TU Darmstadt</i>	159

THEORIEN UND METHODEN

THEORIES AND METHODS

Data Farming im Kontext von Produktion und Logistik <i>Feldkamp, Niclas; Bergmann, Sören; TU Ilmenau;</i> <i>Schulze, Thomas; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg;</i> <i>Straßburger, Steffen; TU Ilmenau</i>	169
Einsatz von Varianzreduktionstechniken in aktuellen Simulationswerkzeugen <i>Völker, Sven; Hochschule Ulm;</i> <i>Gutenschwager, Kai; Ostfalia Hochschule;</i> <i>Schmidt, Peter-Michael; Siemens Industry Software GmbH</i>	179
Automatisierte Modellverifikation mithilfe einer Äquivalenzprüfung an einem Referenzmodell für einen Einsatz in der Lehre <i>Akbulut, Akin; Universität Paderborn;</i> <i>Laroque, Christoph; Westsächsische Hochschule Zwickau;</i> <i>Dangelmaier, Wilhelm; Universität Paderborn</i>	189
Mesoskopische Simulationsmodelle in der Produktions- und Logistikplanung <i>Reggelin, Tobias; Lang, Sebastian; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg;</i> <i>Schauß, Christian; Volkswagen AG;</i> <i>Weigert, David; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg</i>	199
Nachnutzung von Wissen in Simulationsstudien <i>Stolipin, Jana; Wenzel, Sigrid; Universität Kassel</i>	209
Simulationsergebnis und das Ergebnis der Simulationsstudie in Form der resultierenden Handlungsempfehlung – Fallbeispiel einer Simulationsstudie bei der Rudolph Logistik Gruppe <i>Fritzsche, Philipp; Abel, Dennis; Rudolph, Torsten; Rudolph Logistik Gruppe</i>	219
Approaching the Reduction of Uncertainty in Production System Design through Discrete-Event Simulation <i>Ettagibel Larrañaga, Asier; Flores García, Erik; Mälardalen University</i>	229
Durchgehende Modellerstellung zwischen Simulations-, Visualisierungs- und Konstruktionswerkzeugen für die gesamtheitliche Planung von Produktions- und Intralogistiksystemen <i>Weigert, David; Aurich, Paul; Reggelin, Tobias;</i> <i>Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg</i>	239
Simulativer Vergleich zentraler und dezentraler Steuerungen einer Getriebefertigung <i>Willeke, Nils; Opel Automobile GmbH;</i> <i>Scheffermann, Robert; flexis AG;</i> <i>Kuhrke, Benjamin; Kuschicke, Felix; Opel Automobile GmbH;</i> <i>Uhlmann, Eckart; TU Berlin</i>	249
Analysing the Influence of Hinterland Transportation Costs on Port Market Share: A Combined Discrete-Event and Agent-based Simulation Approach <i>Elbert, Ralf; Müller, Jan Philipp; Scharf, Katrin; TU Darmstadt</i>	259

LOGISTIK

LOGISTICS

- Simulation konträrer Instandhaltungsstrategien für Offshore-Windenergieanlagen
Oelker, Stephan; Ait Alla, Abderrahim; Lewandowski, Marco; Freitag, Michael; Universität Bremen..... 269
- Zielgerichtete, simulationsgestützte Optimierung von Routenzugsystemen
Martini, Andreas; Mauksch, Tobias; Stache, Ulrich; Universität Siegen 279
- Simulationsbasierte Bewertung von intralogistischen Prozessen am Beispiel der Warenbereitstellung im Einzelhandel
Heger, Jens; Koch, Stefan; Voss, Thomas; Leuphana Universität Lüneburg..... 287
- Simulation von Transport- und Sortieranlagen mit Pulks
Noche, Bernd; Jawale, Mandar; Universität Duisburg-Essen 295

PERSONAL IN DER SIMULATION

STAFF IN SIMULATION

- Developing a Motion Study Simulation Object Toolkit
Szántó, Norbert; Monek, Gergő; Jósvai, János; Széchenyi István University..... 305
- Einfluss von Mitarbeiterqualifikationszeiten im Rahmen nachhaltiger Produktionsplanung
Vitzthum, Thorsten; Claus, Thorsten; TU Dresden - IHI Zittau; Herrmann, Frank; OTH Regensburg 315
- Simulationsunterstützte Entwicklung von Methoden zur reaktiven Steuerung von Demontagelinien
Hrdina, Jan; Conti Temic microelectronic; Zülch, Gert; Karlsruher Institut für Technologie 325
- Evakuierungssimulation von Kreuzfahrtschiffen
Meyer, Jan-Dirk; Klußmann, Jens; Hochschule Emden/Leer 335

SIMULATION IN LEHRE UND AUSBILDUNG

SIMULATION IN TEACHING AND EDUCATION

- Mobile Lernumgebung zur simulativen Gestaltung von Produktionssystemen
Müller, Bastian; TU Berlin; Kühn, Markus; Schele, Moritz; UNITY AG; Seliger, Günther; TU Berlin..... 345
- Einsatz von simulationsgestützten Lernszenarien für die Ausbildung im Projektmanagement bei Infrastrukturprojekten
Bockel, Björn; Spang, Konrad; Universität Kassel..... 355

PRODUKTIONS- UND LOGISTIKNETZWERKE

PRODUCTION AND LOGISTICS NETWORKS

- Integrierte, zweistufige Methodik zur Kostenoptimierung volatiler
Distributionssysteme am Beispiel der Bauzulieferindustrie
Bauer, Kai Philipp; Pohlig, Denise; Linder, Andreas; Haase, Veronika;
ifp consulting GmbH & Co. KG 365
- Strategisch-taktische Planung und Gestaltung von Produktionsnetzwerken für die
schiffbauliche Fertigung mithilfe der Materialflusssimulation
Sender, Jan; Illgen, Benjamin; Fraunhofer IGP 373

SIMULATION UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

SIMULATION AND ECONOMICS

- Simulative Bestimmung des Wirtschaftlichkeitspotenzials von
Produktionsstrukturen
Schuh, Günther; Prote, Jan-Philipp; Luckert, Melanie; Müller, Christiane;
RWTH Aachen 383

DATEN IM KONTEXT DER SIMULATION

DATA IN THE CONTEXT OF SIMULATION

- Transformation of Real-time Reporting Event Data to Long-term Simulation Models
Gißrau, Mike; Gereke, Torsten; SYSTEMA Systementwicklung GmbH 393
- Functional Interaction of Simulation and Data Analytics – Potentials and Existing
Use-Cases
Laroque, Christoph; Westsächsische Hochschule Zwickau;
Skoogh, Anders; Gopalakrishnan, Maheshwaran;
Chalmers University of Technology 403
- Improving the Accuracy of Cycle Time Estimation for Simulation in Volatile
Manufacturing Execution Environments
Pfeiffer, Andrés; Gyulai, Dávid; Monostori, László; MTA SZTAKI 413

EINSATZ VON PETRI-NETZEN

USAGE OF PETRI NETS

- Industrie 4.0 in der Entsorgungslogistik am Beispiel eines Müllheizkraftwerkes –
Modellierung und exemplarische Simulation mit Petri Netzen
Franke, Hubertus; Czenskowsky, Torsten; Felsch, Thomas;
Ostfalia Hochschule 423
- Prozess-Simulation in kleinen und mittleren Unternehmen mittels des
Baukastensystems KMUSimMetall
Rudel, Steffi; Universität der Bundeswehr München 433

SIMULATIONSANWENDUNGEN IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE
SIMULATION APPLICATIONS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Einführung von offenen Standards in der Ablaufsimulation am Beispiel der Schnittstelle Layout-Fördertechnikplanung
Mayer, Gottfried; Mieschner, Marielouise; BMW AG 443

Virtuelle Inbetriebnahme zur Absicherung flexibler Produktionssysteme
Thiel, Inga; BMW AG;
Vielhaber, Michael; Universität des Saarlandes..... 451

Simulationsgestützte Planung von Lager- und Produktionsversorgungsprozessen
Jósvai, János; Szántó, Norbert; Széchenyi István University..... 459

FALLBEISPIELE FÜR DIE SIMULATION
USE CASES FOR SIMULATION

Simulationsgestützte Entwicklung einer innovativen Fertigungssteuerung
Bös, Mathias; SDZ GmbH..... 469

Simulationsgestützte Entscheidungsunterstützung für das Produktionsmanagement einer Verzinkerei
Richter, Michael; Glaser, Rolf; Seppeler Gruppe;
Wenzel, Sigrid; Jessen, Ulrich; Universität Kassel..... 479

Simulationsstudie zur sequentiellen Behälterversorgung in der automatischen Intralogistik
Forstner, Robert; SimPlan AG;
Herrmann, Frank; OTH Regensburg;
Stauber, Stephan; SimPlan AG..... 489

Industrie 4.0 – Chance oder Risiko für die Ablaufsimulation

Industry 4.0 – Chance or Risk for Material Flow Simulation

Gottfried Mayer, Marielouise Mieschner, BMW AG, München (Germany),
gottfried.mayer@bmw.de, marielouise.mieschner@bmw.de

Abstract: The federal initiative industry 4.0 has led to a considerable movement in digitization. That will also have an impact on the digital factory. How will this change affect the material flow simulation? Is it an opportunity to increase the importance or is it a risk to become less important? This article examines both aspects and gives an overview of possible risks and chances.

1 Motivation

Die Bundesinitiative Industrie 4.0 hat viel Bewegung in die Themen der Digitalisierung gebracht. Der Begriff geht auf die Forschungsunion der deutschen Bundesregierung zurück, eingeschlossen in ein Projekt der Hightech-Strategie der Bundesregierung (vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2013). Hiermit soll die vierte industrielle Revolution, nach der Mechanisierung, der Fließproduktion und der Elektrifizierung bzw. Automatisierung, herbeigeführt werden.

Die Initiative lässt sich in vier Organisationsprinzipien einteilen:

- **Vernetzung:** Alle Komponenten der Produktionsprozesse, nicht nur die Steuerungs- bzw. Regelungstechnik, sind miteinander vernetzt und können über das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) untereinander sowie mit den Menschen kommunizieren.
- **Informationstransparenz:** Die bereits vorhandenen Daten werden durch Sensordaten ergänzt und erweitern somit die Modelle der digitalen Fabrik. Es entsteht ein virtuelles Abbild der Fertigung, der sogenannte digitale Zwilling (Digital Twin). Die Fülle der Daten wird über Methoden der Big Data Analytics beherrscht und ermöglicht neben einem genauen Abbild auch Voraussagen zu Problemen oder Störungen (vorbeugende Instandhaltung, Predictive Maintenance). Modelle der Fertigung können als digitaler Schatten betrieben werden, d. h. sie laufen parallel zum Fertigungsprozess und verhalten sich exakt gleich.
- **Technische Assistenz:** Mit Hilfe von digitalen Methoden werden Menschen unterstützt, fundierte Entscheidungen zu treffen bzw. Probleme schneller zu beheben (Unterstützung durch Virtual Reality bzw. Augmented Reality). Des Weiteren

können schwere oder gefährliche Arbeiten physisch unterstützt werden, z. B. durch kooperierende Roboter oder Exoskelette.

- Dezentrale Entscheidungen: Cyberphysische Systeme treffen eigenständige Entscheidungen (Künstliche Intelligenz, KI), um die Aufgaben der Produktion autonom zu erledigen. Nur in Ausnahmefällen oder bei extremen Ereignissen übertragen sie die Entscheidung an die nächsthöhere Instanz.

Obwohl es keine genauen Definitionen gibt und das Thema viel Spielraum für Interpretationen lässt, wird Industrie 4.0 vor den Gewerken der digitalen Fabrik keinen Halt machen und hier Änderungen veranlassen (vgl. Bracht et al. 2011). Für jede Disziplin wird es Chancen und Risiken geben, die hier für die Ablaufsimulation genauer betrachtet werden.

2 Chancen

Eines der größten Probleme der Ablaufsimulation ist die Bereitstellung der Basisdaten. Oft müssen Annahmen getroffen werden, weil die Daten nicht in der nötigen Menge oder Qualität vorliegen (vgl. Wenzel et al. 2008). Dies könnte sich mit dem Grundsatz der Informationstransparenz signifikant ändern. Nicht nur genauere Daten, sondern auch bessere und gezieltere Auswertemöglichkeiten können hier nützlich sein. Durch den Einsatz von zusätzlicher Sensorik werden genauere Aussagen über die Verfügbarkeit von einzelnen Komponenten, wie z. B. Robotern oder Schweißzangen, möglich sein. Dieser Informationshub wird zu erkennen geben, ob gleiches Equipment unterschiedlicher Hersteller oder unterschiedlicher Bauart unterschiedliches Verhalten zeigt. Da nicht nur das Equipment selbst, sondern auch der Standort oder der Wissensstand der Instandhaltung Einfluss auf die Verfügbarkeitswerte der einzelnen Komponenten haben, können hier auch Daten für diese Faktoren gewonnen werden. In der Realität fehlende Kombinationen können aus den vorhandenen Daten abgeleitet bzw. interpoliert werden. Durch diesen Informationsgewinn wird es möglich, Anlagen komponenten- und standortabhängig zu planen und zu simulieren und somit das passende Produktionskonzept für die gegebenen Rahmenbedingungen zu planen und zu realisieren.

Durch gezielte Datensammlung in sogenannten Data Lakes werden benötigte Daten jederzeit und vollständig zur Verfügung stehen. Durch die Methoden der Big Data Analytics kommt zur Datensammlung und Bereitstellung noch die Möglichkeit dazu, Massendaten gezielt auszuwerten und zu komprimieren. Ziel ist es hier, einen geschlossenen Kreis (Closed Loop) zu schaffen (Abb. 1), sodass Daten aus der Fertigung wieder gezielt in die Planung einfließen können. Ein exaktes Datenabbild wird auch bei der Verifikation und Validierung des Simulationsmodells sowie dessen Ergebnissen helfen (zu den Begriffen Verifikation und Validierung vgl. Rabe et al. 2008).



Abbildung 1: Closed Loop für Daten

Dieser Closed Loop Ansatz geht auch mit der Methodik der kontinuierlichen Verbesserung (KVP) einher. Hier wird der PDCA-Zyklus (Plan/Do/Check/Act) verwendet, der sogenannte Shewhart-Zyklus oder auch Demingkreis (vgl. Shewhart 1980). Dieser ist hier zwar dreiphasig, lässt sich aber einfach übertragen:

- Plan steht für die Planung in der Ablaufsimulation.
- Do steht für die Umsetzung in der Produktion/Fertigung.
- Check steht für die Rückführung der Daten in die Planung/Ablaufsimulation.
- Act steht wiederum für die Überplanung bzw. Absicherung der Planung mit den realen Daten.

Eine bessere Datengrundlage wird die Basis für maschinelles Lernen sein, mit dem sich Abläufe innerhalb der Fertigungsbereiche besser verstehen und dadurch abbilden lassen. Eine Kopplung dieser Ergebnisse mit der Ablaufsimulation ergibt genauere Modelle und somit genauere Ergebnisse. Auch ein Simulationsmodell als Grundlage für Lernen an einem zukünftigen System ist vorstellbar, womit ein zukünftiger Wissensstand generiert werden kann, der direkt in der Fertigung anwendbar ist.

Durch die Ziele von Industrie 4.0 werden sich die Abläufe innerhalb der Produktion signifikant ändern. Dezentrale Entscheidungen werden einen neuen Komplexitätshub für die Planung der Produktionssysteme auslösen. Der Einsatz von selbstfahrenden Fördersystemen, die sich frei in der Produktionshalle bewegen können und nicht mehr starr verkettet sind, führt dazu, dass diese Systeme nicht mehr diskret abbildbar sind. Gleiches gilt für Produkte, die ihren Fertigungszustand kennen und wissen, welche Produktionsschritte fehlen bzw. als nächstes benötigt werden.

Dies wird eine Steigerung der Flexibilität innerhalb der Fertigung bringen, aber auch Verständnisprobleme innerhalb des kompletten Systems. Hier kann die Ablaufsimulation ein gutes Hilfsmittel sein, um diese gestiegene Komplexität zu veranschaulichen.

Daraus ergeben sich weitere Anwendungsbereiche auch für die Emulation. In der Emulation werden die Steuerungssysteme abstrahiert abgebildet, können aber vollständig mit den übergeordneten Steuerungssystemen, wie z. B. einem Lagerverwaltungsrechner, kommunizieren. Hierfür müssen dann auch nicht mehr alle Steuerungen im Detail bekannt sein, was oft sowieso nicht möglich ist, wenn diese verschlüsselt

eingekauft werden. Die Steuerungen werden direkt an die Simulation angekoppelt, und das Gesamtverhalten der Fertigung wird gegenüber den Detailsteuerungen emuliert.

Das Ansinnen der Informationstransparenz wird in den bereits oben erwähnten digitalen Zwillingen enden. Hier wird es ein exaktes digitales Abbild der realen Fertigung in den Planungs- und Simulationssystemen geben. Die Ablaufsimulation kann hier z. B. verwendet werden, um die übergeordneten Steuerungssysteme oder auch die lokale Steuerung abzubilden. Dazu ist es notwendig, die Ablaufsimulation mehr in die digitale Fabrik zu integrieren und gegebenenfalls die Interoperabilität mit anderen Methoden der digitalen Fabrik oder auch neuen Methoden, initiiert durch Industrie 4.0, zu verbessern (vgl. Mayer und Pöge 2013).

3 Risiken

Die voranschreitende Digitalisierung bietet nicht nur Chancen für die Ablaufsimulation, sondern birgt auch Risiken.

Ein großes Thema ist die lange Zeitdauer, die für eine Simulationsstudie benötigt wird. Zwar hat sich die Dauer in den letzten Jahren, bedingt durch schnellere Simulationshardware, Optimierungen (Mayer et al. 2012; Mayer und Mieschner 2015) und Standardisierungen (Mayer und Pöge 2010), schon signifikant verkürzt, aber agile Sprints im Zweiwochentakt, wie in der Softwareentwicklung, sind aktuell nur schwer zu halten. Da die Dauer einer Simulationsstudie nicht alleine von der Experimentphase abhängig ist, helfen auch hier Cloud-Lösungen nur bedingt. Sie ermöglichen zwar, viele Simulationsläufe parallel abzuarbeiten, aber die vorgelagerten und nachgelagerten Punkte aus dem Vorgehensmodell (Abb. 2) werden nur wenig beeinflusst. Im Vorgehensmodell ist durch Cloud-Computing-Lösungen nur die Experimentdurchführung betroffen.



Abbildung 2: Vorgehensmodell für Ablaufsimulationsstudien nach AssistSim/EDASim (in Anlehnung an Mayer et al. 2012, S. 175)

Eine Umfrage, die im VDA (Verband der Automobilindustrie) durchgeführt wurde, zeigt allerdings, dass der meiste Aufwand einer Simulationsstudie nicht in der Experimentdurchführung liegt (vgl. Abb. 3 sowie Mayer und Pöge 2013).

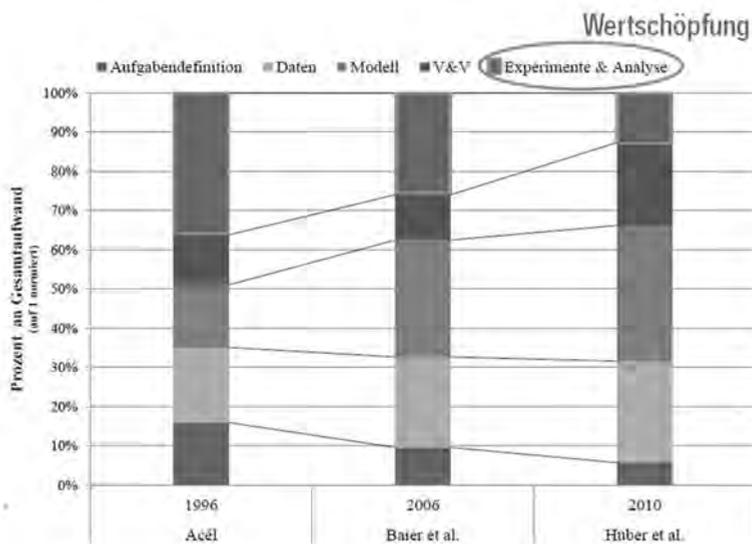


Abbildung 3: Aufwand bei Simulationsstudien (Huber und Wenzel 2011, S. 29)

Hier zeigt sich, dass die Aufwände für Datenbereitstellung und -aufbereitung (in der Abbildung „Daten“), für Modellerstellung (in der Abbildung „Modell“) sowie für die Validierung und Verifikation (V&V) des Simulationsmodells in den letzten Jahren im Gegensatz zu denen der Aufgabendefinition und Experimentdurchführung gestiegen sind. Hier kann zwar der Industrie 4.0-Grundsatz der Datentransparenz positive Effekte erzielen, aber ohne automatisierte Modellerstellung sowie Validierung und Verifikation werden die agilen Ziele nicht erreicht werden können.

Qualitativ bessere Daten könnten auch der mathematischen Optimierung dienen, die gegenüber der Ablaufsimulation den Vorteil hat, dass bei einer guten Datenanbindung /Datenbereitstellung und einem vorhandenen Modell und definierten Zielfunktionen gleich direkte Aussagen „on the fly“ möglich sind. Modelle könnten aus dem digitalen Zwilling, der dem exakten Abbild der Fertigung entspricht, direkt extrahiert und in ein mathematisches Modell überführt werden.

Durch die Bereitstellung von Massendaten und automatisch erzeugten mathematischen Modellen wird es zukünftig möglich sein, die Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) zu nutzen, um aus der Vergangenheit, also den mitprotokollierten Realdaten, sowie der Zukunft, also den Ergebnissen der Optimierungsmodelle, zu lernen. Dies würde zu einer selbstlernenden und sich selbst optimierenden Fertigung führen. Hier ist im ersten Schritt die Ablaufsimulation zur Validierung und Verifikation der Ergebnisse nötig. Ist dieser Schritt abgeschlossen, könnte sie aber an dieser Stelle obsolet sein, da ein validiertes mathematisches Modell schneller zu Ergebnissen führt.

Auch die Informationstransparenz stellt ein Risiko für die klassische Ablaufsimulation dar. Wenn alle Systeme in digitalen Zwillingen verfügbar sind, sogar bis hinunter in die lokale Steuerung wie z. B. dem SPS-Code (Speicherprogrammierbare Steuerung) oder dem Roboterprogramm, dann können Änderungen in der Produktion direkt in diesen Abbildern getestet und optimiert werden. Dies hat den Vorteil, dass die Änderungen an der Software direkt auf die Produktion übertragen werden können. Änderungen werden hier direkt von den zuständigen Experten durchgeführt und abgesichert, sodass auch keine weiteren Zwischenschritte oder Kommunikationen nötig sind. Die Abstraktion der Fertigungsschritte in der Ablaufsimulation ist für Integrationsprojekte nicht notwendig, da der digitale Zwilling bereits ein detailliertes Abbild der Fertigung enthält.

Neue Fertigungsverfahren werden es ermöglichen, dass Produkte oder auch Beförderungssysteme mit Produktionszellen dezentral kommunizieren. Somit wird eine übergeordnete Steuerung auf ein Minimum reduziert und die eigentliche Bewegung der Teile oder Produkte in der Fabrikhalle basiert auf Begebenheiten in der Produktion. Die freie Bewegung in der Fabrikhalle hängt dann davon ab, wie sich Logistik, Produktion und Menschen in der Halle bewegen. Die Absicherung eines solchen Systems mit Hilfe der Ablaufsimulation wird schwer möglich sein, da die Varianten der Eingangsdaten nahezu unendlich erscheinen.

Durch Vernetzung, Informationstransparenz sowie der Möglichkeit, dass dezentrale Entscheidungen direkt durch oder am Bauteil getroffen werden können, wird es auch möglich sein, die Fertigung „smarter“, also intelligenter hinsichtlich der Verbrauchswerte wie Strom oder Druckluft, zu gestalten. Da z. B. Trafostationen oder Druckluftkompensatoren für die maximale benötigte Leistung ausgelegt werden müssen, können dezentral geregelte Fertigungsverfahren die Last verteilen und somit

zu Einsparungen führen. Dies ist aktuell mit der Ablaufsimulation nur schwer abbildbar und benötigt einen wesentlich höheren Detaillierungsgrad, der wiederum für die Abbildung in digitalen Zwillingen spricht. Im digitalen Zwilling ist die Detaillierung bis auf die Steuerungsprogramme und Komponentenbewegungen runtergebrochen. So ist dann auch eine Kommunikation der Steuerungen untereinander, abhängig vom aktuellen Zustand der Anlage, möglich.

Ein weiterer Punkt, der gegen die derzeit durchgeführte Ablaufsimulation spricht, ist das Thema vorbeugende Instandhaltung (Predictive Maintenance). Durch die frühzeitige Erkennung von Verschleiß oder anderen Problemen der Produktionskomponenten werden sich die Verfügbarkeitswerte dieser Komponenten signifikant verbessern. Durch die kontinuierliche Verbesserung werden die Kennwerte der Komponenten nicht mehr konstant sein. Da diese Werte eine wichtige Eingangsgröße für die Ablaufsimulation sind, wird hier keine konstante und belastbare Datengrundlage mehr vorliegen.

Ein großes Problem der aktuellen Simulationswerkzeuge ist die zum Teil fehlende Offenheit. Die Entwicklungen und die Veränderungen in der Produktion, induziert durch Industrie 4.0, schreiten teilweise schneller voran, als die Softwarehersteller reagieren können. Somit laufen die Werkzeuge Gefahr, obsolet zu werden, da sie die neuen Produktionsprozesse nicht mehr abbilden können. Auch eine geforderte Interoperabilität mit anderen Simulationswerkzeugen ist oft nicht gegeben.

4 Ausblick

Industrie 4.0 ist ein derzeit noch recht junges Thema, aber ein sehr agiles. Eine definitive Aussage, was und wie sich die Methoden der Ablaufsimulation ändern werden bzw. müssen, ist derzeit nicht möglich. Es bestehen Chancen und Risiken für das Thema. Wägt man beide Seiten gegeneinander ab, besteht die Gefahr, dass die Ablaufsimulation obsolet wird, wenn sich die Simulationswerkzeuge nicht mitentwickeln.

Der entscheidende Punkt wird die Anpassungsgeschwindigkeit der Software an die aufkommenden Anforderungen sein. Diese muss steigen, um die Ablaufsimulation als Baustein der Industrie 4.0 und des digitalen Zwillinges zu befähigen. Neue Methoden und Techniken erfordern neue Absicherungsmöglichkeiten. Anbindungen an neue Methoden, z. B. für Big Data und Data Lakes, sind nötig, um die Vorteile von Industrie 4.0 nutzen zu können. Auch werden Schnittstellen und Interoperabilität mit anderen Werkzeugen nötig sein, um den Wandel, der bevorsteht, mitgestalten zu können.

Literatur

- Bracht, U; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele. Berlin: Springer 2011.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung: Zukunftsbild „Industrie 4.0“. Berlin 2013.
- Huber, L.; Wenzel, S.: Trends und Handlungsbedarfe der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. *Industrie Management* 27 (2011) 5, S. 27-30.
- Mayer, G.; Mieschner, M.: Geführte Assistenz für Ablaufsimulationsprojekte. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2015*. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2015, S. 605-612.
- 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, Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 29-36.
- Mayer, G.; Pöge, C.: Quo vadis Ablaufsimulation – Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung*. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2013, S. 11-19.
- Mayer, G.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Steigerung der Produktivität in Simulationsstudien mit Assistenzwerkzeugen. *ZWF* 107 (2012) 3, S. 174-177.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Shewhart, W.: *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. Milwaukee: ASQ Quality Press 1980.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

*Simulation in Produktion
und Logistik 2017*
Sigrid Wenzel & Tim Peter (Hrsg.)
kassel university press, Kassel 2017

Betrachtungen energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik: Eine Literaturanalyse

Considering Energetic Influences in the Simulation of Production and Logistics: a Literature Review

Sigrid Wenzel, Tim Peter, Universität Kassel, Kassel (Germany),
s.wenzel@uni-kassel.de, tim.peter@uni-kassel.de

Johannes Stoldt, Andreas Schlegel, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und
Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany), johannes.stoldt@iwu.fraunhofer.de,
andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de

Guido Groß, Siemens Industry Software GmbH, Stuttgart (Germany),
guido.gross@siemens.com

Holger Pitsch, INCONTROL Simulation Solutions, Wiesbaden (Germany),
holger.pitsch@incontrolsim.com

Markus Rabe, TU Dortmund, Dortmund (Germany), markus.rabe@tu-dortmund.de

Marco Seewaldt, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld (Germany),
mse@imab.tu-clausthal.de

Abstract: In recent years, an increasing consideration of environmental impacts in simulation studies in production and logistics can be observed. This is partially motivated by the climate change, but also by economic interests of companies. Thus, many simulation solutions exist, but still no standardization for the execution of simulations considering energetic influences has been established. The ASIM working group “Consideration of Energetic Parameters in Simulation in Production and Logistics” commenced an extensive methodical literature review to document the state-of-the-art in this sector. This paper presents both the methodical approach and the first result of the analysis, the so-called research map. Furthermore, selected samples are presented, describing simulation studies and solutions throughout the value chain. Concluding, an outlook on the next steps of the working group in creating an internationally adhered survey as a basis for standardization is given.

1 Motivation und Zielstellung

Seit Mitte der 2000er Jahre erfährt die Betrachtung von Umweltwirkungen in der Simulation von Produktions- und Logistiksystemen und -prozessen immer größere

Bedeutung. Dies ist auf verschiedene marktwirtschaftliche und politische Einflüsse zurückzuführen. Müller et al. (2009) nennen dazu als unternehmensexterne Treiber „steigende Energiepreise, wachsende Energienachfrage, sinkende Energiereserven und Versorgungssicherheit, nachgewiesene Umweltbelastung aus Energieerzeugung und -nutzung sowie Restriktionen der Politik“ (Müller et al. 2009, S. 6). Letztere entstammen vor allem dem wachsenden gesellschaftlichen Konsens, dass der Klimawandel infolge menscheninduzierter Treibhausgase verlangsamt, wenn nicht aufgehalten werden muss. Trotz unterschiedlicher internationaler, europäischer und nationaler Abkommen oder Verträge zeigt sich jedoch, dass für Unternehmen wirtschaftlicher Erfolg bisweilen der größte interne Treiber ist. Dabei ist festzustellen, dass insbesondere im Bereich der industriellen Produktion kaum restriktive Gesetze zur Verringerung von Umweltwirkungen bestehen (Bauernhansl 2014, S. 19 ff.). So wird in Deutschland zumeist aus politischer Sicht nach den Grundsätzen „Fordern – Fördern – Informieren“ (Bauernhansl 2014, S. 21) gehandelt.

Umso wichtiger ist es für Produktions- und Logistikunternehmen, etwaige Effizienzmaßnahmen, aber auch ihre eigenen Operationen, hinsichtlich der Leistungsfähigkeit zu prüfen. Die Simulation stellt dabei ein zentrales Werkzeug zur Untersuchung auch sehr komplexer Zusammenhänge zwischen produktionslogistischen Abläufen und den peripheren Energie- und Medienversorgungssystemen in Unternehmen dar. Ein großer Vorteil gegenüber statischen Verfahren liegt insbesondere in der Möglichkeit, dynamische Wechselwirkungen und stochastische Einflüsse zu berücksichtigen: eine Grundvoraussetzung für eine gesicherte Planung (vgl. Rabe et al. 2008; Wenzel et al. 2008). Der wissenschaftliche Diskurs der vergangenen Jahre bestätigt diese Bedeutung. Zugleich ist festzustellen, dass trotz der Vielzahl und Vielfältigkeit dokumentierter Simulationslösungen für diesen Bereich (vgl. auch Literaturanalysen in Thiede 2012; Andersson et al. 2012; Thiede et al. 2013; Sproedt et al. 2015; Roemer und Strassburger 2016) bisweilen noch keine Standardisierung für die Durchführung derartiger simulationsgestützter Untersuchungen erfolgt ist.

Unter diesem Eindruck wurde 2014 innerhalb der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik (SPL)“ die Arbeitsgruppe „Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL“ gegründet. Diese nähert sich der Erfassung des tatsächlichen Bedarfs durch eine umfassende Analyse des bisherigen Standes von Wissenschaft und Technik in Form einer Forschungslandkarte.

Dieser Beitrag stellt ausgewählte Ergebnisse der Literaturanalyse vor. Nach kurzer Erläuterung des methodischen Vorgehens im zweiten Abschnitt erfolgt zunächst eine geographische Einordnung bestehender Forschungsarbeiten (Abschnitt 3). Daran schließt sich eine Übersicht über Branchen, die sich mit energetischen Fragestellungen in der simulationsgestützten Planung beschäftigen, an (Abschnitt 4). Eine ausführlichere Darstellung der Forschungsaktivitäten wird beispielhaft entlang der Wertschöpfungskette in Abschnitt 5 durchgeführt. Ein Fazit und Ausblick erläutern die weitere Verwendung der Landkarte für zukünftige Aufgaben der Arbeitsgruppe.

2 Methodisches Vorgehen zur Landkartenerstellung

Im Vordergrund der Analyse des bisherigen Standes von Wissenschaft und Technik steht die Entwicklung einer thematischen Landkarte zum Einsatz der Simulation bei der Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in Produktion und Logistik. Hierzu

werden mittels einer Literaturanalyse Forschungsarbeiten und Publikationen identifiziert, die Simulationsfragestellungen aus den Bereichen Produktion und Logistik mit Bezug zur Abbildung von Energieflüssen behandeln. Zur Einordnung der in den jeweiligen Publikationen beschriebenen Modelle und Anwendungen hat die Arbeitsgruppe die folgenden 11 Kategorien erarbeitet:

1. Einsatzziele und Zwecke der Simulationen mit energetischem Kontext
2. Fokus im Systemlebenszyklus
3. Fokus in der Wertschöpfungskette
4. Fertigungsstruktur
5. Fertigungsart
6. Branche
7. Detaillierungsgrad zur Modellierung
8. Gewählter Architekturansatz zur Simulation von Material-/Energieflüssen
9. Eingesetzte Simulationswerkzeuge
10. Eingangsdaten- bzw. Informationskategorien für die Energiebetrachtung
11. Kennzahlen aus der Simulation im Hinblick auf energetischer Aspekte

Jeder Kategorie sind konkrete inhaltliche Ausprägungen zugeordnet. So umfasst beispielsweise die Kategorie 8 „Gewählter Architekturansatz zur Simulation von Material-/Energieflüssen“ als Ausprägungen die Integration der Energiebewertung in ein ereignisdiskretes Modell, die ereignisdiskrete Simulation mit nachgelagerter (Excel-basierter) Auswertung, zwei getrennte Simulationsmodelle für Energie und Produktion in zwei Werkzeugen ohne Kopplung, mit Offline-Kopplung (zur Datenübertragung) oder online gekoppelt, ein Werkzeug mit zwei Simulationsmethoden in einem Modell oder eine rein kontinuierliche Simulation.

Mit der Zuordnung einer Publikation zu einer oder mehreren Ausprägungen der einzelnen Kategorien entsteht ein umfassender Überblick über die aktuellen Forschungen in diesem Themenfeld. Zudem können Forschungslücken identifiziert werden, wenn einer Ausprägung einer Kategorie keine Literaturstelle zuzuordnen ist. Diese können dann in zukünftigen Projekten gezielt adressiert werden.

3 Geographische Einordnung der Arbeiten

Zur Strukturierung der analysierten Publikationen wird zunächst ermittelt, wie sich die in dem Themenfeld forschenden Institutionen über die Welt verteilen. Hierzu werden die Standorte der publizierenden Institutionen auf einer Karte dargestellt. Wenn Personen aus unterschiedlichen Einrichtungen an einer Publikation beteiligt sind, wird nur der Standort des Erstautors der Publikation visualisiert. Des Weiteren beinhaltet die resultierende Grafik keine Aussage über die Anzahl der Publikationen einer Einrichtung oder über deren Aktualität. Abbildung 1 zeigt einen Auszug aus der geographischen Landkarte am Beispiel Europa und verdeutlicht, an wie vielen Standorten in den jeweiligen Ländern eine Publikation identifiziert werden konnte.

Auf der Landkarte sind Institutionen, die Publikationen zu energetischen Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik verfasst haben, mit schwarzen Punkten markiert (vgl. Stoldt et al. (2016) in Chemnitz, Thiede (2012) in Braunschweig oder Andersson et al. (2012) in Göteborg). Teilweise forschen an einer Institution mehrere Fachgebiete in diesem Bereich. Beispiele dafür sind Peter und Wenzel (2015) sowie Hesselbach et al. (2008), die in unterschiedlichen Fachgebieten

an der Universität Kassel tätig sind, oder auch Rabe et al. (2015) und Kaffka et al. (2015) aus zwei Instituten der Technischen Universität Dortmund. In diesem Fall wird der Standort aus Gründen der Übersicht trotzdem nur durch einen Punkt markiert.

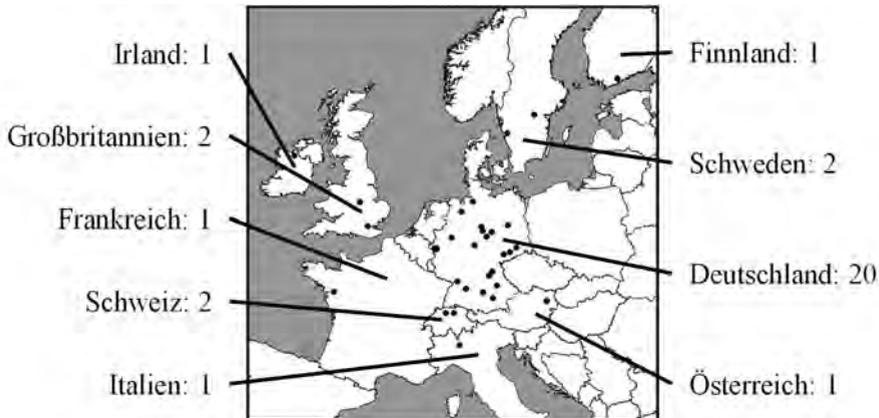


Abbildung 1: Landkarte mit den identifizierten Institutionen mit Publikationen in Europa (eigene Darstellung in Anlehnung an San Jose und Patroll10 2017)

Eine Auswertung der geographischen Verteilung macht deutlich, dass knapp die Hälfte der identifizierten Institutionen in Deutschland ansässig ist, weitere 2 % in Österreich und 5 % in der Schweiz. Die internationalen Institutionen verteilen sich zu je 22 % auf das inner- und außereuropäische Ausland. Letzteres ist nicht auf der Landkarte dargestellt. Es zeigt sich, dass ein Schwerpunkt der bisher identifizierten Publikationen im deutschsprachigen Raum liegt, während in Frankreich und Großbritannien nur wenige Publikationen und im osteuropäischen Raum keine Publikation gefunden werden konnten. Für die weitere Arbeit an der Landkarte muss daher eine gezielte Recherche in den bisher nur bedingt vertretenen Ländern erfolgen.

Um ein ganzheitliches Bild zu ermöglichen und neben den Standorten auch die Institutionen und die Autorengruppen darzustellen, plant die Arbeitsgruppe, zukünftig die Karte mit den in diesem Themenbereich aktiven Forschungsinstitutionen auf einer webbasierten Plattform zu veröffentlichen. Auf dieser sollen auch die entsprechenden Literaturstellen sowie die beteiligten Autoren genannt werden. Die Web-Landkarte soll so die Voraussetzung schaffen, eigenständig ermitteln zu können, an welchen Standorten zu dieser Art der Simulation geforscht wird, und mögliche Ansprechpartner für einen fachlichen Austausch oder gemeinsame Projekte sichtbar machen. Darüber hinaus soll sie weiteren Forschern in diesem Bereich erlauben, sich aktiv mit ihren Publikationen einzubringen.

4 Übersicht betrachteter Branchen

Die Tagungsbände früherer Konferenzen im Bereich der Simulationstechnik zeigen, dass der Automobilbausektor häufiger Lieferant von Fallstudien ist. Dieses Bild bestätigte sich auch bei der Erstellung der Landkarte. Dabei ist einerseits die Zahl der

Arbeiten so groß und andererseits die Art der eingesetzten Prozesse so unterschiedlich, dass diese Branche nochmals in Fahrzeugbau (z. B. Schacht 2014) und Komponentenfertigung bzw. Zulieferteile (z. B. Khalaf 2012) unterschieden wird.

Insgesamt können Arbeiten aus 21 Branchen identifiziert werden. Im Einzelnen sind das: Automobilbau, Berg-/Tagebau, chemische Industrie, Elektronik-/Energie-technikproduktion, Entsorgung und Recycling, Halbleiterindustrie, Handel, Hoch-/Tiefbau, Holzindustrie, Logistik, Konsumgüterindustrie, Kosmetik- und Pharma-industrie, kunststoffverarbeitende Industrie, Lebensmittelindustrie, sonstiger Fahrzeugbau, Maschinen- und Anlagen- sowie Werkzeugbau, Medizintechnik, Metallbearbeitung und -erzeugung, Stahl-/Metallbau, Textilindustrie sowie Verkehrslogistik/Verkehrsinfrastrukturplanung. Auffällig ist dabei, dass die aktiven Forschergruppen zumeist über Simulationsanwendungen aus unterschiedlichen Bereichen berichten. Somit verteilen sich die Arbeiten abseits des Automobilbaus relativ homogen über die weiteren sowohl energieintensiven als auch nicht energieintensiven Branchen. Erstaunlich ist in diesem Zusammenhang, dass keine Arbeiten aus der Baustoff- oder der Papierindustrie identifiziert werden konnten und auch in der chemischen Industrie nur eine Simulationsanwendung bekannt ist. Gründe hierfür lassen sich in Bezug auf Unzulänglichkeiten bestehender Simulationslösungen oder mangelndem Potenzial in der Simulationsanwendung vermuten; entsprechende Nachweise sind aber nicht aus der bisher vorliegenden Literatur abzuleiten.

5 Simulationsstudien entlang der Wertschöpfungskette

Die Kategorie „Fokus in der Wertschöpfungskette“ umfasst als Ausprägungen Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, Beschaffung, Distribution, Produktion Intralogistik (einschließlich Warehousing), Verpackung sowie Entsorgung und Recycling. In den folgenden Abschnitten werden Simulationsstudien aus Produktion und Logistik mit energetischem Bezug auszugsweise für die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, für die Produktion und für logistische Prozesse dargestellt. Hierzu werden Beschaffung, Distribution und Intralogistik aus Platzgründen unter dem Begriff „logistische Prozesse“ zusammengefasst. Die Aspekte Verpackung, Entsorgung und Recycling werden in diesem Beitrag nicht adressiert.

5.1 Rohstoffgewinnung und -verarbeitung

Die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung ist üblicherweise sehr energieintensiv und hat zumeist signifikante Umweltauswirkungen. Dabei wird im Kontext der Landkarte die Extraktion von Rohstoffen aus der Natur als Gewinnung und der darauffolgende Verarbeitungsschritt (z. B. Erz-Verhüttung zu Stahl oder Mahlen von Korn zu Mehl) als Rohstoffverarbeitung verstanden. Insgesamt hat die Literaturrecherche gezeigt, dass es nur sehr wenige Arbeiten in diesen Bereichen gibt. Diese behandeln insbesondere Tagebau-Fallstudien und fokussieren auf die Ermittlung von Äquivalenten zur Einschätzung der Ökobilanz. Dabei werden zumeist System-Dynamics-Modelle eingesetzt, in denen der eigentliche Produktionsfluss nur mittelbar Beachtung findet.

Um die Energieeffizienz in Systemen dieser Wertschöpfungsphasen zu steigern, ist die gleichzeitige Betrachtung des Anlagenbetriebs und des Energieverbrauchs bzw. der Umweltbeeinflussung von großer Bedeutung. Untersuchungen auf dieser

Betrachtungsebene haben bislang lediglich Fanghänel et al. (2015) für einen Braunkohletagebau vorgestellt. Jain et al. (2012) betrachten hingegen die Gänge von Prozessen einer Wertschöpfungskette mit System Dynamics, nutzen für Detailbetrachtungen jedoch auch die ereignisdiskrete Simulation, allerdings nur für die Produktionsphase. Wie bereits für die Baustoff- und Papierindustrie kann auch für diese Wertschöpfungsphasen ein Potenzial für weitere Arbeiten identifiziert werden.

5.2 Produktion

Dominierenden Zielgrößen zur Planung und zum Betreiben von Produktionsanlagen sind Kosten, Zeit und Qualität bzw. daraus abgeleitete produktionsspezifische Kennzahlen wie Ausbringungsmenge, Bestände oder Produktionszeiten. Der Faktor Energie spielte bisher in diesem Zielgrößenspannungsfeld kaum eine Rolle. Die in den letzten Jahren steigende Anzahl an Veröffentlichungen zeigt hier einen Wandel auf. Im Mittelpunkt der gesamten Wertschöpfungskette steht die eigentliche Produkt-erstellung. Dies spiegelt auch die Anzahl an Literaturstellen wider, die für einen weitflächigen Einsatz der Simulation mit Energiebezug spricht.

Nach Keller und Reinhart (2016) kann grundsätzlich zwischen der energieeffizienten und energieflexiblen Produktion unterschieden werden. Bei der Energieflexibilisierung von Anlagen steht im Vordergrund, die benötigte Energie zum richtigen Zeitpunkt bereitzustellen. Durch organisatorische Maßnahmen in der Produktionsplanung oder technisch angepasste Systeme werden einzelne Produktionsprozesse auf Basis ihres prognostizierten Energieverbrauchs mit dem Ziel angestoßen, den Lastgang der gesamten Fabrik zu optimieren (Liebl et al. 2015). Die analysierte Literatur zeigt, dass Energieflexibilität vornehmlich bei energieintensiveren Produktionsanlagen Beachtung findet. Umfangreichere Arbeiten finden sich jedoch im Bereich der Energieeffizienz.

Die energieeffiziente Produktion verfolgt den Ansatz, die eingesetzte Energie besser in der Produktion zu nutzen und eine höhere Energieproduktivität (Verhältnis von Energieeinsatz und gefertigter Menge) zu erreichen. Dabei kann zwischen direkt und indirekt zur Produkterstellung eingesetzter Energie differenziert werden. In beiden Fällen werden Simulationen mit Energiebezug sowohl für die Planung als auch für den Betrieb von Produktionsanlagen eingesetzt. Drei Schwerpunkte können unter Energieaspekten in den Arbeiten identifiziert werden:

- *Dimensionierung der Medienversorgung* der Produktionsanlage sowie der umgebenden Fabrikhalle: Planung aller wichtigen Medien wie Beleuchtung, Druckluft, Prozesswärme/-kälte, Klima- und Lüftungstechnik sowie elektrische Energie.
- *Technische Anlagenoptimierungen*: Optimierung von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Bahnkurven von Industrierobotern und Fertigungsprozessen.
- *Optimierter Anlagenbetrieb*: Ausnutzung aller möglichen energetischen Betriebszustände (Operational, Standby, Off) von Anlagen und Maschinen.

5.3 Logistische Prozesse

Logistische Prozesse lassen sich grob in intralogistische Prozesse (innerhalb einer Betriebsstätte) und die verbindenden Prozesse der Supply Chain unterscheiden, wobei letztere sowohl die Beschaffung als auch die Distribution miteinschließen. Während im Allgemeinen über deutlich mehr Simulationsstudien im Bereich der Intralogistik

berichtet wird, sind Simulationsstudien unter Einbeziehung energetischer Aspekte im Bereich der Supply Chains häufiger. Dies mag darin begründet sein, dass in Zeiten der Globalisierung und eines entsprechenden Transportaufkommens Prozesse der Supply Chains signifikant zum Energieverbrauch und damit auch zur Umweltbelastung beitragen. In diesem Zusammenhang ist technologisch zu berücksichtigen, dass bei der Anwendung für Supply Chains anstelle der ereignisdiskreten Simulation teilweise mit Zeitscheiben (beispielsweise von einem Tag) gerechnet wird, was je nach Granularität der abzubildenden Steuerungen auch durchaus hinreichend sein kann. Weitere Ansätze verwenden etwa System Dynamics oder – dann ohne Berücksichtigung der Zeit – auch Monte-Carlo-Simulation (z. B. Gruler et al. 2017). Gerade für eher strategische Aspekte der Supply Chain (etwa im Themenfeld der Beschaffung) bietet sich System Dynamics als Lösungsmethode an (vgl. Boosothonsatit et al. 2012; Jain et al. 2012).

Allgemein stehen Nachhaltigkeitsaspekte bei den Studien selten im Vordergrund (vgl. Rabe und Deininger 2012), wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass die Einsparung von Kosten durch Optimierung der Transportleistung typischerweise auch zu Energieeinsparungen führt. Rabe und Deininger (2012) zeigen auch auf, dass das Modell häufig nur logistische Daten liefert, aus denen nachträglich, indirekt die Energiebedarfe berechnet werden. Darüber hinausgehende Ansätze finden sich etwa bei Kaffka et al. (2015), die Kranspielen spezifische Energieverbräuche zuordnen, bei Grundmeier et al. (2015) für Teilaspekte von Containerterminals oder für die Zuordnung einzelner Transport- und Lagervorgänge in Mehrproduktsystemen bei Brockmann (2013) sowie Rabe et al. (2015).

Eine detailliertere Betrachtung der energetischen Aspekte von Transportanlagen findet sich in einigen intralogistischen Anwendungen. So betrachten etwa Cataldo et al. (2015) für eine produktionstechnische Anwendung sowie Rudolph et al. (2012) für eine Gepäckförderanlage das Transportsystem bis auf die Aktuatoren- und Motorebene hinunter und können so den Energieverbrauch im Detail, etwa für stromsparende Leerlaufmodi, berücksichtigen.

Generell ist anzumerken, dass entsprechende Aspekte der Nachhaltigkeit (insbesondere für die Supply Chain) im Forschungsfeld der Life Cycle Analysis (LCA) auf breiter Basis untersucht werden, jedoch hier der Detaillierungsgrad im Hinblick auf die logistischen Prozesse völlig anders ist als bei der Betrachtung mit Simulation. So zeigen Gutenschwager et al. (2013), dass der unreflektierte Einsatz sonst üblicher und zielführender LCA-Berechnungsansätze für das Ziel der Energieeinsparung unter Optimierung der logistischen Detailprozesse völlig ungeeignet sein kann.

Zunehmend an Bedeutung gewinnt die Simulation für Transporte in urbanen Räumen, wo über die Energieeinsparung hinaus auch andere Aspekte der Nachhaltigkeit, wie Lärm, Verkehrsstaus, Feinstäube u.v.m., im Fokus stehen. Gerade in Ballungsräumen würden sich hier Kollaborationen zwischen Unternehmen anbieten, die aber – vor allem aus Überlegungen von Marketing, Kundenbindung oder Prozesshoheit heraus – noch überraschend wenig genutzt werden. Hier kann mit Simulation die konkrete Energieeinsparung aufgezeigt werden, die zunächst auch immer mit einer Kosteneinsparung verbunden ist, welche aber mit zusätzlichen Aufwänden (etwa für zusätzliche Umschlagprozesse oder Umschlagzentren) ins Verhältnis gesetzt werden muss. Neuere Beispielstudien haben gezeigt, dass Einsparungen der gefahrenen Kilometer in Bereich von 20 % realistisch sein können (Rabe et al. 2016). Indes kann

die Zusammenführung von Logistiksystemen grundsätzlich auch einen gegenteiligen Effekt haben (vgl. Rabe et al. 2015), was eine vorherige Simulationsanalyse erforderlich macht.

6 Fazit und Ausblick

Mit einer systematischen Analyse der bislang veröffentlichten Forschungs- und Praxisarbeiten im Themenfeld der simulativen Betrachtung von energetischen Einflussfaktoren in Produktion und Logistik konnte die ASIM-Arbeitsgruppe den bisherigen Stand von Wissenschaft und Technik erfassen. Dieser wurde übersichtlich in einer Forschungslandkarte zusammengestellt, die sowohl die Aktivitäten regional darstellt als auch Bedarf und Bereitschaft von Branchen und Nationen sehr gut widerspiegelt. Durch die Analyse und Aufbereitung ist es zudem gelungen, einerseits die Notwendigkeit der Betrachtung dieser Faktoren zu untermauern und andererseits eine grundlegende Basis für die Entwicklung eines Standards für die Durchführung von Simulationsstudien mit Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren zu definieren.

Die Arbeitsgruppe wird im nächsten Schritt eine Themen-Datenbank zur Sicherung des Wissensstandes einrichten, die durch weitere publizierte Forschungsarbeiten ergänzt werden soll. Dabei soll der Betrachtungsfokus gezielt ausgeweitet werden, um Aspekte, etwa basierend auf Regelungen oder Besonderheiten in bislang nicht betrachteten Branchen und speziell in zusätzlichen Staaten, einzubringen und so einen umfassenden, international geltenden Stand zu erzielen und zu publizieren. Einen Ansatz zur Internationalisierung stellt etwa die Vorstellung und Diskussion des Ergebnisstandes auf der WinterSim-Konferenz 2018 in Göteborg dar.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Arbeitsgruppe „Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL“ in der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik (SPL)“ erarbeitet. Die Autoren danken ausdrücklich allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe.

Literatur

- Andersson, J.; Skoogh, A.; Johansson, B.: Evaluation of methods used for life-cycle assessments in Discrete Event Simulation. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. Berlin: IEEE 2012.
- Bauernhansl, T. (Hrsg): Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie. Berlin, Heidelberg: Springer 2014.
- Boosothonsatit, K.; Kara, S.; Ibbotson, S.: A Generic Simulation Model for Green Supplier Selection. In: Dornfeld, D.A.; Linke, B.S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 587–592.
- Brockmann, D.: Ansatz zur Bestimmung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods mit Hilfe von Simulation.

- Dortmund: TU Dortmund, Fachgebiet IT in Produktion und Logistik, Masterarbeit, 2013..
- Cataldo, A.; Scattolini, R.; Tolio, T.: An energy consumption evaluation methodology for a manufacturing plant. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 11 (2015), S. 53–61.
- Fanghänel, C.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Putz, M.; Lange, H.R.; Woldt, T.: Energieeffizienzsteigerung im Tagebaubetrieb durch simulationsgestützte Untersuchung konkurrierender Flexibilitäten. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 545–554.
- Gruler, A.; Klueter, A.; Rabe, M.; Juan, A.A.: A Simulation-Optimization Approach for the Two-Echelon Location Routing Problem Arising in the Creation of Urban Consolidation Centers. In diesem Tagungsband. 2017.
- Grundmeier, N.; Ihle, N.; Hahn, Z.: Ein Simulationsmodell zur Abbildung und Prognose der elektrischen Leistungsaufnahme in Seehafen-Containerterminals. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 555–564.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Sari, M.U.; Fechteler, T.: A data model for carbon footprint simulation in consumer goods supply chains. In: Pasupathy, R.; Tolk, A.; Hill, R.; Kuhl, M.E. (Hrsg.): *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*. Savannah: IEEE 2013, S. 2677–2688.
- Hesselbach, J.; Herrmann, C.; Detzer, R.; Martin, L.; Thiede, S.; Lüdemann, B.: Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services. In: Kaebernick, H. (Hrsg.): *Applying life cycle knowledge to engineering solutions*. Sydney, Australia: 2008, S. 624–628.
- Jain, S.; Lindskog, E.; Johansson, B.: Supply chain carbon footprint tradeoffs using simulation. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. Berlin: IEEE 2012, S. 1–12.
- Kaffka, J.; Clausen, U.; Miodrag, Z.; Pitsch, M.: Allokation von Emissionswerten auf Behälterebene in multimodalen Umschlagsanlagen mittels Simulation. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 565–574.
- Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 244–249.
- Khalaf, S.: Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Erstellung energieeffizienter Fertigungsstrategien für verkettete Fertigungssysteme. Aachen: Shaker 2012.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M.F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen–Energieflexibilitäts-Kennfelder zur Abschätzung der Energieflexibilitäts-Potentiale unterschiedlicher Anlagen. *wt Werkstatttechnik online* 105 (2015) 3, S. 136–140.
- Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- Peter, T.; Wenzel, S.: Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 535–544.
- Rabe, M.; Clausen, U.; Klueter, A.; Poeting, M.: An approach for modeling collaborative route planning in supply chain simulation. In: Roeder, T.M.K.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.):

- Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference. IEEE 2016, S. 2228–2238.
- Rabe, M.; Deininger, M.: State of Art and Research Demands for Simulation Modeling of Green Supply Chains. *International Journal of Automation Technology* 6 (2012) 3, S. 296–303.
- Rabe, M.; Sari, M.U.; Fechteler, T.; Ruini, L.F.: Discrete event simulation as a strategic decision instrument for a CO₂ – and cost-efficient distribution chain applied in the FMCG sector. *International Journal of Advanced Logistics* 4 (2015) 1, S. 47–53.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Roemer, A.C.; Strassburger, S.: A review of literature on simulation-based optimization of the energy efficiency in production. In: Roeder, T.M.K.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.): *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*. Washington DC: IEEE 2016, S. 1416–1427.
- Rudolph, M.; Mohsen, A.; Reinschke, J.; Halmuschi, N.; Hassel, J.: *Simulation von Maschinen und Anlagen zur Verbesserung der Energieeffizienz*. Tagungsband „Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabrikssysteme–VPP2012“ Chemnitz: TU Chemnitz IBF (2012), S. 191–201.
- San Jose; Patroll10: File:Europe countries map.png – Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Europe_countries_map.png&oldid=120922341. Letzter Zugriff am 26.04.2017.
- Schacht, M.: *Erweiterung des Planungsprozesses im Karosserierohbau um Energieaspekte zur Auslegung der Technischen Gebäudeausrüstung*. Herzogenrath: Shaker 2014.
- Sproedt, A.; Plehn, J.; Schönsleben, P.; Herrmann, C.: A simulation-based decision support for eco-efficiency improvements in production systems. *Journal of Cleaner Production* 105 (2015), S. 389–405.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Putz, M.: Enhanced integration of energy-related considerations in discrete event simulation for manufacturing applications. *Journal of Simulation* 10 (2016) 2, S. 113–122.
- Thiede, S.: *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Thiede, S.; Seow, Y.; Andersson, J.; Johansson, B.: Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 1, S. 78–87.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell

Weak Point Analysis and Process Improvement of Non-ferrous Melting and Die-casting Plants Using Bidirectional Coupling of a Material Flow Model with an Energy Model

Wolfgang Schlüter, Matthias Henninger, Andreas Buswell, Jörg Schmidt,
Hochschule Ansbach, Ansbach (Germany),
Wolfgang.Schlueter@hs-ansbach.de, Matthias.Henninger@hs-ansbach.de,
A.Buswell@hs-ansbach.de, Jo.Schmidt@hs-ansbach.de

Abstract: This paper outlines the use of bidirectionally coupled material flow and energy models for non-ferrous melting and die-casting industries. An interface-based communication between continuous and time-discrete processes is created by means of a hybrid simulation environment based on the simulation tools MATLAB, Simulink and Stateflow. This allows the examination of different logistical measures with extensive consequences on the supply chain. The simulation results are used to determine the effects on logistical key figures such as productivity and energy efficiency. These key figures are suitable to evaluate the benefit of the applied measures for the actual plant.

1 Einführung

Die Bedeutung der Energieeffizienz hat speziell in Deutschland infolge der Energiewende und der steigenden Konkurrenz durch die Globalisierung stark zugenommen. Das Energie- und Kosteneinsparungspotenzial ist dabei in energieintensiven Industriezweigen, wie z. B. der Nichteisen (NE)-Schmelz- und Druckgussindustrie besonders hoch. In dieser Branche liegt der Energieverbrauch pro Tonne gutem Guss in der Regel zwischen 2000 und 6000 kWh (Belt 2015; Bosse et al. 2013; Herrmann et al. 2013). Dies führt zu einer hohen Energiekostenbelastung, die laut dem statistischen Bundesamt 25 % der Bruttowertschöpfung übersteigen kann (Schimansky 2017). Bis zu 60 % der aufgebrachten Energie entfallen auf den Aufschmelzvorgang des Aluminiums, der in der Regel in gasbefeuerten Sekundäraluminiumschmelzöfen der werksinternen Schmelzerei abläuft. Die Energieeffizienz der verwendeten Schmelzöfen ist stark

abhängig von deren Bauart, Alter, Auslastung und Betriebsweise (Belt 2015; Felder et al. 2014; LfU 2005; Salonitis et al. 2016).

Fundiertes Wissen zur energieeffizienten Steuerung von Produktionsabläufen mittels simulationsgestützter Verfahren existiert seit längerem. Als Beispiel hierfür kann die Arbeit von Junge (2007) genannt werden. Zur Umsetzung speziell in Gießereien existieren seit jüngster Vergangenheit ebenfalls Untersuchungen (Fuss et al. 2013; Fuss et al. 2014; Krause et al. 2012). Eine weitere Studie zur energieeffizienten Produktion von Aluminiumdruckguss (Herrmann et al. 2011) wurde im Forschungsprojekt ProGRes durchgeföhrt. Die Ergebnisse zeigen Energieeffizienzpotenziale für die jeweiligen Betriebskomponenten. Die kleine Betriebsgröße (ein Schmelzofen, drei Aluminiumverbraucher) ermöglichte es jedoch nicht, Steuerungsstrategien für einen effizienten Schmelzofenbetrieb zu entwickeln.

Eine Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang die Mischung aus ereignisdiskreten und kontinuierlichen Prozessen dar, die aus der gegenseitigen Beeinflussung von Produktions- und Logistikprozessen sowie der Berücksichtigung energetischer Einflussgrößen resultiert. In einer Studie von Peter und Wenzel wird für die Simulation von Produktionssystemen in der Automobilindustrie eine Kopplung aus den kommerziellen Programmen Plant Simulation (Materialfluss) und MATLAB/Simulink (Energiefluss) genutzt, um die bidirektionalen Wechselwirkungen zwischen Materialfluss und energetischen Größen abzubilden (Peter und Wenzel 2015). Eine auf energetischen Untersuchungen basierende Einbindung der vorgelagerten Schmelzöfen wurde dabei allerdings nicht vorgenommen.

Die Literaturstudie zeigt, dass bezüglich NE-Schmelz- und Druckgussbetrieben keine Veröffentlichungen zu bereichsübergreifenden Prozessmanagementsystemen, die eine energetisch optimierte Steuerung der Schmelzöfen ermöglichen, verfügbar sind. Die Hochschule Ansbach arbeitet im Rahmen des Green Factory Bavaria Projektes *Smart Melting* (GFB 2017) an einem derartigen Prozessmanagementsystem. Um die komplexen Zusammenhänge des Betriebes unter unterschiedlichsten Betriebsbedingungen untersuchen zu können und das Prozessmanagementsystem ohne direkten Eingriff in die Produktion testen und verbessern zu können, wird ein Simulationsmodell des Gesamtbetriebes entwickelt. Dieses besteht aus einem Materialflussmodell, den Energiemodellen der Schmelzöfen und dem Steuerungsmodul. In dem vorliegenden Artikel werden der Aufbau des den Gesamtbetrieb abbildenden Simulationsmodells und die Kopplung der Teilmodelle beschrieben. Mit dem entwickelten und validierten Simulationsmodell werden anschließend verschiedene Betriebszenarien und die Wirksamkeit unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen untersucht.

2 Grundlagen

Die vorliegende Studie bezieht sich auf einen mittelgroßen bis großen NE-Schmelz- und Druckgussbetrieb. Die zugrundeliegenden Prozesse sind nachfolgend dargestellt:

- Anlieferung von flüssigem Aluminium bzw. Blockmaterial (Masseln) (Abb. 1, a)
- Beschickung der gasbetriebenen Schachtschmelzöfen (SO) über Stapler mit Masseln, Rücklauf- oder Ausschussmaterial (Abb. 1, b)
- Erwärmen, Schmelzen und Überhitzen bzw. Warmhalten des Metalls (Abb. 1, c)

- Verteilung des flüssigen Aluminiums mit Staplern auf die Dosieröfen der Gussmaschinen (Abb. 1, d)
- Produktion von Gussteilen in den Druckgussmaschinen (DGM) und Qualitätsprüfung (Abb. 1, e)
- Transport von vollen/leeren Materialbehältern aus dem Druckgussbetrieb oder von Masselpaketen aus dem Lager zum Schmelzbetrieb (Abb. 1, f)

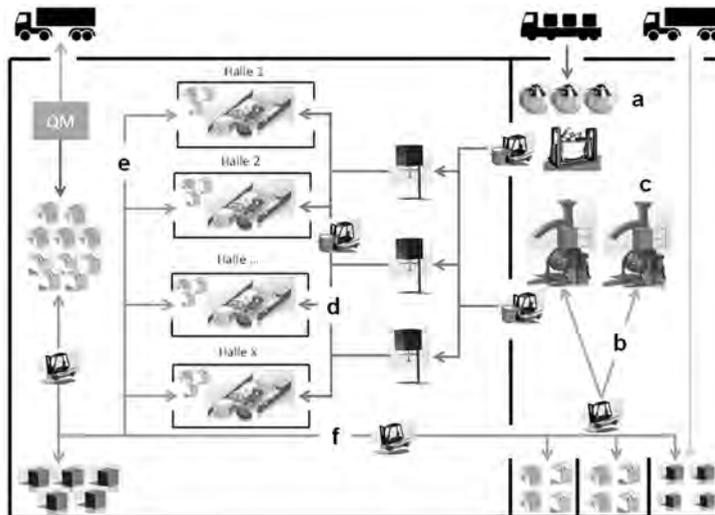


Abbildung 1: Schema eines Schmelz- und Druckgussbetriebs

Die Schmelz- und Warmhaltevorgänge (Abb. 1, c) in den Schmelzöfen stellen komplexe thermodynamische Prozesse dar, die durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst werden. Um eine korrekte Simulation des gesamten Druckgussbetriebs zu ermöglichen, ist daher ein dynamisches Berechnungsmodell der Vorgänge im Innern des Ofens notwendig, das an die Simulation des Materialflusses im Betrieb gekoppelt ist.

3 Simulationsmodell

Der Aufbau des Simulationsmodells, bestehend aus den Teilmodellen Energiefluss, Materialfluss und Prozesssteuerung, ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Energieflussmodell dient zur Berechnung der thermodynamischen Vorgänge der Aluminiumschmelzöfen. Mithilfe des Materialflussmodells wird der komplette Materialfluss innerhalb des Betriebs erfasst. Zwischen Material- und Energieflussmodell liegt eine bidirektionale Kopplung vor: Dem Energiemodell werden einerseits Informationen über eine Einbringung bzw. Entnahme von festem oder flüssigem Aluminium zur Verfügung gestellt (Abb. 2, a). Andererseits übergibt das Energiemodell dem Materialfluss die wichtigsten Ofendaten wie beispielsweise die aktuelle Schmelzleistung oder die Menge an verfügbarem Flüssigaluminium (Abb. 2, b).

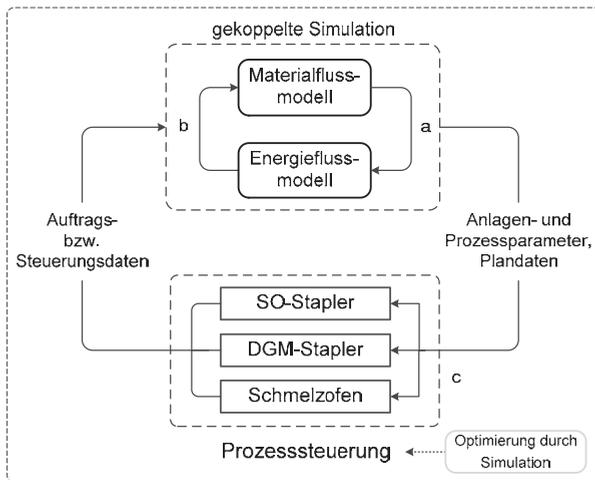


Abbildung 2: Aufbau und Struktur des Simulationsmodells

Das Modul der Prozesssteuerung (Abb. 2, c) bestimmt die Steuerungseingriffe für die Schmelzöfen und Stapler. Hierzu werden die durch das Material- und Energieflussmodell ermittelten Anlagen- und Prozessparameter eingelesen und ausgewertet. Aus diesen Daten werden geeignete Steuerungseingriffe abgeleitet, die von der Prozesssteuerung an die gekoppelte Simulation übergeben werden.

Die hybride Simulation der verschiedenen Prozesse wurde mithilfe einer Kombination der Simulationstools MATLAB, Simulink und Stateflow realisiert, die jeweils die folgenden Funktionen erfüllen:

- MATLAB: Simulationssteuerung, Objektinstanziierung und -verwaltung, Auswertung
- Simulink: Simulation der kontinuierlichen Prozesse
- Stateflow: Simulation der ereignisdiskreten Prozesse

Um die Kommunikation der einzelnen Systeme zu ermöglichen, wird eine Schnittstelle zwischen den Simulink- und Stateflow-Modellen benötigt. Diese ist durch „Interpreted MATLAB Functions“ realisiert (Abb. 3). Die IN-Funktion übergibt die notwendigen Anlagenparameter und Events an die entsprechenden Komponenten. Die Wertänderungen des Systems werden für jeden Zeitschritt in der OUT-Funktion durch Abfrage des Status ermittelt. Hier erfolgt in Abhängigkeit des Status die Anpassung der Prozessparameter.

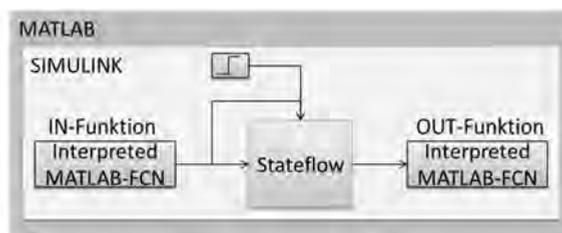


Abbildung 3: Schnittstelle zwischen MATLAB, Simulink und Stateflow

In der Simulation werden neben dem An- und Ausschalten (Simulation von Ausfallzeiten) der Komponenten die Produktionsaufträge für die Druckgussmaschinen zugewiesen. Bei der betriebsabhängigen Auftragsdatenermittlung werden die Aufträge "Just in Time" zusammengestellt und immer der aktuell „optimale“ Auftrag ermittelt.

3.1 SO-Stapler-Steuerung

Mit dieser Steuerung werden die Lagerverwaltung des festen Aluminiums und die Materialeinbringung (Beschickung) des festen Materials in die Schmelzöfen vorgenommen. Dabei werden im Wesentlichen der Zeitpunkt, die Masse und die Materialart der Beschickung vorgegeben. Die Steuerung ist somit entscheidend für den Füllstand des festen Aluminiums im Schmelzschacht. Mithilfe des Simulationsmodells können die Auswirkungen unterschiedlicher SO-Stapler-Steuerungskonzepte auf die Schmelzöfen untersucht und analysiert werden.

3.2 DGM-Stapler-Steuerung

Für den Produktionsbetrieb ist eine gesicherte Versorgung der Druckgussmaschinen mit Aluminium entscheidend. Daher kommt der Steuerung der Stapler zur Verteilung des Flüssigaluminiums, von den Schmelzöfen, über eine Impellerstation, hin zu den Druckgussmaschinen, besondere Bedeutung zu. Über den Steuerungsalgorithmus werden die Materialquelle (Schmelzofen), die zu befüllenden Materialsenken (Druckgussmaschinen) und die daraus resultierende Entnahmemenge bestimmt.

Die zu befüllenden Druckgussmaschinen können dabei grundsätzlich anhand verschiedener Kriterien ausgewählt werden. In der Industrie erfolgt die Auswahl in der Regel über ein Ampelverfahren, das für einen bestimmten Füllstandbereich eine definierte Signalfarbe (rot – gelb - grün) aufweist. Eine Verbesserung dieser Auswahlvariante kann mithilfe der Erfassung und des Vergleichs der genauen Maschinen-Füllstände erfolgen. Eine weitere Alternative hierzu bietet die Verteilung auf Basis der Restlaufzeiten der Druckgussmaschinen. Dabei wird derjenige Dosierofen zuerst befüllt, der nach aktuellem Füllstand, gegebener Taktzeit und dem produktabhängigen Schussgewicht die geringste Restlaufzeit bis zu einem Stillstand aufgrund von Materialmangel aufweist.

4 Validierung der Simulation

Die Berechnungsergebnisse der gekoppelten Simulation können durch eine an den Referenzbetrieb angepasste Konfiguration (Beschickungsstrategie, Produktionsplan etc.) und Betriebsdaten, die schichtübergreifend für eine vollständige Kalenderwoche aufgezeichnet wurden, validiert werden.

Hierbei ergeben sich für das Materialflussmodell Abweichungen in der Anzahl der produzierten Aluminiumgussteile und der verbrauchten Aluminiummenge von 1,4 bzw. 0,9 %. Diese gehen auf ungeplante Stillstände der Druckgussmaschinen zurück, die zwar statistisch angenähert, aber nicht präzise vorausgesagt werden können.

Auch die Korrektheit des Energiemodells kann anhand der aufgezeichneten Daten bestätigt werden. Die geschmolzene Aluminiummasse und der Gasverbrauch

weichen hierbei um 1,5 bzw. 0,5 % von den tatsächlichen Werten ab. Die Genauigkeit der thermodynamischen Berechnungen wird neben der Betrachtung der geschmolzenen Aluminiummasse zusätzlich anhand des zeitlichen Verlaufs der Rauchgastemperatur deutlich (s. Abb. 4).

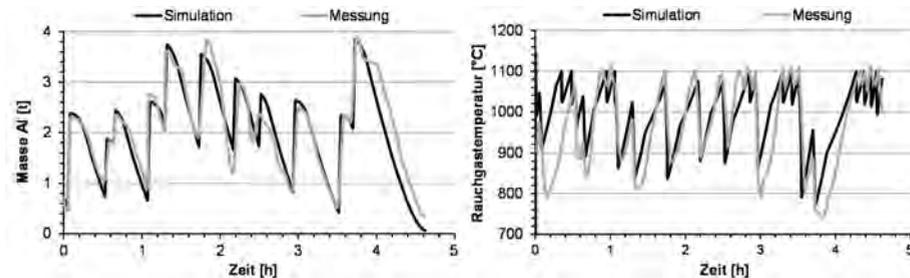


Abbildung 4: Validierung des Energiemodells anhand der geschmolzenen Aluminiummasse und der Gastemperatur

5 Ergebnisse

Die Validierungsergebnisse demonstrieren, dass mithilfe des Simulationsmodells eine präzise Abbildung des realen Betriebs möglich ist. Auf Basis dieser Ausgangskonfiguration werden verschiedene Betriebsszenarien und die Wirksamkeit einzelner Optimierungsmaßnahmen untersucht. Diese beinhalten:

- Variation der SO-Stapler-Steuerung (Beschickungsstrategie)
- Vorwärmung des festen Aluminiums
- Variation des Flüssigaluminiumverbrauchs durch Anpassung der Ausfallzeiten
- Variation der Flüssigaluminiumerzeugung durch Abschaltung einzelner Öfen
- Variation der angelieferten Flüssigaluminiummenge (vgl. Abb. 1, a)

Das Simulationsmodell erlaubt die Variation verschiedener Parameter und Strategien und erfasst ihre Auswirkungen auf Material- und Energiefluss, sodass eine Bewertung der einzelnen Maßnahmen hinsichtlich maßgeblicher Faktoren wie Produktivität, Produktionssicherheit und Energieeffizienz möglich wird.

5.1 Einfluss der Ausfallzeiten auf die Produktivität

Als Bewertungszahl für die Produktivität des Betriebs eignet sich neben der Anzahl produzierter Aluminiumgussteile insbesondere die *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) der Druckgussmaschinen, die als Maß der Anlagenverfügbarkeit dient.

Aus den Messungen im untersuchten Referenzbetrieb ergeben sich Ausfallzeiten (geplant und ungeplant) der Druckgussmaschinen in Höhe von 30 % der Gesamtlaufzeit. In dieser Konfiguration begrenzen ausschließlich die Druckgussmaschinen die erzielbare Produktivität des Betriebs; es liegt also ein Überschuss an Flüssigaluminium vor. Durch Reduktion der Ausfallzeiten (beispielsweise durch Realisierung eines verbesserten Wartungskonzepts) kann die Produktivität des Gesamtbetriebs deutlich gesteigert werden. Die Auswirkungen reduzierter Ausfallzeiten auf die Produktivität können in der Simulation berechnet und dargestellt werden (Abb. 5).

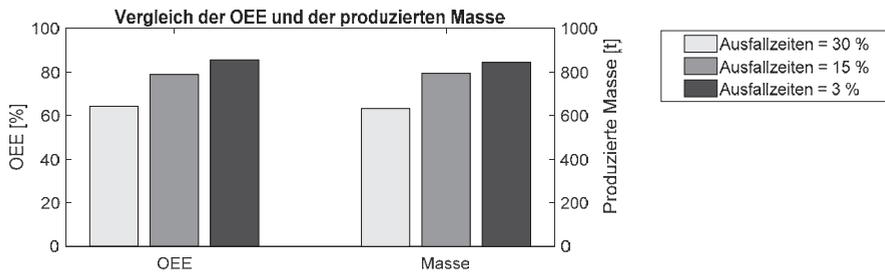


Abbildung 5: Auswirkungen der Ausfallzeiten auf die Produktivität

Infolge einer Reduktion der Ausfallzeiten auf 15 % der Gesamtlaufzeit kann die OEE von 64 % auf 79 % gesteigert werden. Eine weitere Senkung der Ausfallzeiten auf 3 % resultiert wiederum in einer erkennbaren Steigerung der Kennzahl auf 85 %, wobei eine Abschwächung des Effekts erkennbar ist, die aus zusätzlichen Einflussfaktoren auf die OEE, bspw. Ausschussrate und Aluminiummangel (s. Abschnitt 5.2) resultiert.

Abbildung 5 zeigt weiterhin, dass auch die erzeugte Aluminiummasse der Schmelzöfen direkt proportional zu der Verfügbarkeit der Druckgussmaschinen ansteigt. Als Nebeneffekt der Produktivitätssteigerung kommt es also zu einer Zunahme der Schmelzofenauslastung. Für hohe Produktivitätswerte (Ausfallzeiten 3 %) kann der Flüssigaluminiumverbrauch jedoch die Kapazität der Schmelzöfen überschreiten, sodass neben den bisher betrachteten geplanten und ungeplanten Stillständen auch Ausfälle der Druckgussmaschinen aufgrund Aluminiummangels auftreten können.

5.2 Erhöhung der Produktionssicherheit

Um die Produktionssicherheit des Betriebs zu gewährleisten, können Maßnahmen getroffen werden, die die Erzeugungsrate des Flüssigaluminiums in den Schmelzöfen erhöhen. Die Implementation eines Energiemodells in die Simulation ermöglicht die Untersuchung verschiedener Eingriffsmöglichkeiten.

Hierbei zeigen insbesondere die Vorwärmung des festen Aluminiums (bspw. mithilfe einer externen Vorwärmkammer realisierbar) und eine verbesserte Beschickung der Schmelzöfen, die auf möglichst hohe Füllstände der Schmelzschächte abzielt, deutliche Auswirkungen (s. Abb. 6).

Für Ausfallzeiten von 3 % lässt sich mittels Vorwärmung des Ausgangsmaterials auf 300 °C oder optimierter Beschickung eine deutliche Erhöhung der Produktionssicherheit realisieren. So sinkt der Anteil der durch Aluminiummangel resultierenden Anlagenausfälle von 1,7 % auf 0,3 % (Vorwärmung) bzw. 0 % (Beschickung) der betrachteten Zeitdauer. Dadurch kommt es zudem zu einer erkennbaren Steigerung der Betriebsproduktivität, wobei für eine optimierte Beschickung Werte der OEE von über 90 % erzielt werden.

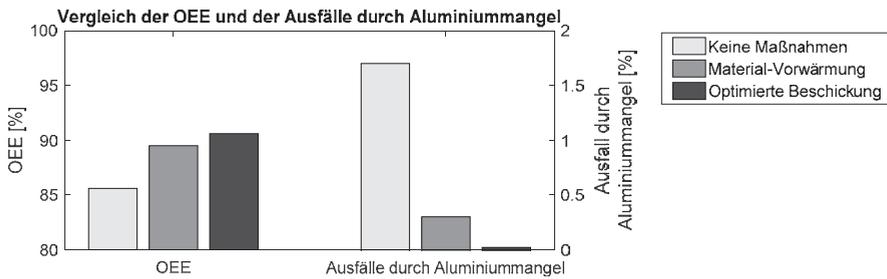


Abbildung 6: Auswirkung der Maßnahmen zur Erhöhung der Produktionssicherheit bei Ausfallzeiten von 3 %

Eine weitere Folge der gezeigten Maßnahmen stellt eine Erhöhung der Energieeffizienz der Schmelzöfen dar. Während der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch bei Ausfallzeiten von 3 % bei 910 kWh/t liegt, kann durch die Vorwärmung eine Senkung um ca. 9 % auf 825 kWh/t beobachtet werden. Die Optimierung der Beschickungsstrategie mit dem Ziel der Gewährleistung hoher Schmelzschachtfüllstände bewirkt eine noch deutlichere Effizienzsteigerung in Höhe von ca. 20 % (spez. Energieverbrauch: 720 kWh/t).

Im realen Betrieb können die oben genannten Verbesserungen aufgrund betrieblicher Vorgänge oder thermischer Verluste nur teilweise erzielt werden. Aus den Ergebnissen kann aber geschlossen werden, dass eine logistische Maßnahme in Form optimierter Beschickungsvorgänge gegenüber einer kostenintensiveren Vorwärmkammer deutliche Verbesserungen der Produktivität, Produktionssicherheit und Energieeffizienz aufweist. Die bisher genannten Maßnahmen können ihr volles Potenzial jedoch nur in Kombination mit deutlichen Reduktionen der Anlagen-Ausfallzeiten oder durch Installation zusätzlicher Druckgussmaschinen realisieren. Da beide Maßnahmen mit einem großen zeitlichen bzw. finanziellen Aufwand verbunden sind, kann anstelle der Erhöhung der Druckgusskapazität auch eine Senkung der Produktionskapazität für Flüssigaluminium angestrebt werden, um eine höhere Auslastung der Öfen und damit eine Verbesserung des Energieverbrauchs zu erzielen.

5.3 Energieeffizienzmaßnahmen

Eine Erhöhung der Schmelzofenauslastung kann auf zwei Arten realisiert werden: einerseits durch Abschaltung bzw. Standby-Betrieb einzelner Öfen, alternativ durch Reduktion der angelieferten Flüssigaluminiummenge.

Zur Untersuchung dieser Effizienzmaßnahmen wird ein Schmelzofen (von vier im Referenzbetrieb) innerhalb der Simulation abgeschaltet und der resultierende spezifische Energieverbrauch der verbliebenen Öfen mit den im realen Betrieb auftretenden Werten verglichen (s. Abb. 7). In einem weiteren Simulationslauf wird die Flüssigaluminiumanlieferung deutlich reduziert (10 % des Ursprungswerts). Bei Ausfallzeiten von 30 % treten keine Betriebsausfälle aufgrund Aluminiummangels auf, sodass die Produktionssicherheit gewährleistet bleibt.

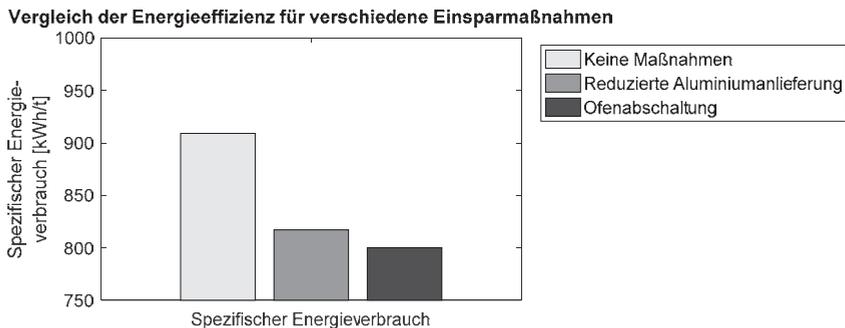


Abbildung 7: Spezifischer Energieverbrauch für verschiedene Einsparmaßnahmen bei Ausfallzeiten von 30 %

Mithilfe der beschriebenen Maßnahmen lässt sich eine Senkung des spezifischen Energieverbrauchs um 10 % (reduzierte Flüssigaluminiumanlieferung) bzw. 12 % (Ofenabschaltung) realisieren. Anders als die unter Abschnitt 5.2 beschriebenen Verbesserungen, ist die Senkung der Produktionskapazität für Flüssigaluminium jedoch nicht mit einer Erhöhung der Produktionssicherheit verbunden, sondern stellt stattdessen ein Risiko für diese dar. Daher sollten entsprechende Maßnahmen nur mit ausführlicher Vorbereitung umgesetzt werden. Mithilfe der Simulation ist es hierbei möglich, Verbesserungspotenziale zu bestimmen, ohne den realen Betrieb zu gefährden.

6 Ausblick

Im Rahmen der vorgenommenen Simulationsstudien wird gezeigt, dass die Auslastung der Schmelzöfen einen erheblichen Einfluss auf deren Energieeffizienz besitzt. Um die globale Energieeffizienz der Öfen in den unterschiedlichen Betriebsituationen zu verbessern, soll das Steuerungsmodul um eine intelligente Ofensteuerung erweitert werden. Diese soll in Abhängigkeit der Aluminiumnachfrage und der Speichersituation die Betriebsweise der Schmelzöfen und die Aluminiumentnahme so vorgeben, dass die Produktion bei minimalem Energieeinsatz gesichert ist.

Eine Anpassung der DGM-Stapler-Steuerung gemäß der bisher verwendeten, in Abschnitt 3.2 vorgestellten, Strategien zeigt keine Verbesserungen der betrieblichen Kennzahlen. In Zukunft soll daher eine weitere Steuerungsvariante für die DGM-Stapler entwickelt werden. Mit dieser soll eine modifizierte „Just in Time“ Lösung in Bezug auf die Befüllung der Druckgussmaschinen realisiert werden. Auch hier wird für die Befüllungsstrategie eine Analyse der Bedarfs- und Vorratssituation des Flüssigaluminiums für eine Sicherstellung der Produktion herangezogen. Die Restlaufzeit einer Druckgussmaschine soll dann jedoch auch geplante Stillstände berücksichtigen, sodass keine Befüllungen vor längeren Ausfallzeiten durchgeführt werden. Zusätzlich werden für diese Stapler-Steuerung Strategien für extreme Produktionsfälle, wie einer längeren Aluminiumknappheit infolge eines Schmelzofenausfalls konzipiert und implementiert. Mit dieser Steuerungsvariante kann anschließend untersucht werden, wie sich eine veränderte Befüllungsstrategie auf die Gesamtenergieeffizienz des Betriebs auswirkt.

Hierzu ist ebenfalls eine Erweiterung des im Rahmen dieser Veröffentlichung beschriebenen Energiemodells nötig, das bisher ausschließlich die Schmelzöfen berücksichtigt. Ziel von weiteren simulativen Untersuchungen ist es, das energetische Modell auf die gesamte Flüssigaluminiumkette innerhalb des Betriebes zu erweitern. Diese Erweiterung schließt die Flüssigaluminiumspeicher der Druckgussmaschinen, die einen relativ hohen Stromverbrauch aufweisen, mit ein.

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU): Effiziente Energieverwendung in der Industrie. Augsburg 2005.
- Belt, C.: Current State of Aluminum Melting and Holding Furnaces in Industry. JOM 67 (2015) 11, S. 2690–2695.
- Bosse, M.; Frost, E.; Hazrat, M.; Rhiemeier, J.-M.; Wolff, H.: Ermittlung von branchenspezifischen Potentialen zum Einsatz von erneuerbaren Energien in besonders energieintensiven Industriesektoren am Beispiel der Gießerei-Industrie. IfG Institut für Gießereitechnik, Ecofys Germany GmbH, Düsseldorf, 2013.
- Felder, P.; Flückiger, U.; Wisskopf, T.: Gießereibetrieb - Pinch-Analyse Prozessanlagen und Heizungsanlagen: Schlussbericht. EnergieSchweiz, Bern, 2014.
- Fuss, E.; Beißert, U.: Beitrag zur Energie- und Materialflusssimulation in Produktion und Logistik. In: Fraunhofer IFF (Hrsg.): 19. Magdeburger Logistiktage: Tagungsband im Rahmen der IFF-Wissenschaftstage Magdeburg. 2014, S. 35–46.
- Fuss, E.; Drvendzija, S.; Krewald, A.: Transparenz als Schlüssel zur energieeffizienten Produktion: Ablaufplanung in Schmelzerei und Gießerei mittels planungsbegleitender Energie- und Materialflusssimulation. Productivity management 18 (2013) 3, S. 35–38.
- Green Factory Bavaria (GFB): Projektbeschreibung Smart Melting. http://greenfactorybavaria.de/gf/cms/front_content.php?idcat=90. Letzter Zugriff am 26.07.2017.
- Herrmann, C.; Pries, H.; Hartmann, G.: Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss. Berlin: Springer Vieweg 2013.
- Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: Kassel Univ. Press 2007.
- Krause, M.; Thiede, S.; Herrmann, C.; Butz, F.: A Material and Energy Flow Oriented Method for Enhancing Energy and Resource Efficiency in Aluminium Foundries. In: Dornfeld, D.; Linke, B. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Berlin Heidelberg: Springer 2012, S. 281–286.
- Peter, T.; Wenzel, S.: Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in production and logistics 2015. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015, S. 535–544.
- Salonitis, K.; Zeng, B.; Mehrabi, H. A.; Jolly, M.: The Challenges for Energy Efficient Casting Processes. Procedia CIRP 40 (2016), S. 24–29.
- Schimansky, C.: Energiepolitik. <http://www.bdguss.de/themen/energie/#.WLAU5PJCMMQ>. Letzter Zugriff am 26.07.2017.

Energieorientierte Betrachtung von Engpässen in Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation

Energy-Oriented Analysis of Bottlenecks in Manufacturing Systems with Material Flow Simulation

Marco Seewaldt, Uwe Bracht, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld (Germany),
marco.seewaldt@imab.tu-clausthal.de, uwe.bracht@imab.tu-clausthal.de

Abstract: Bottlenecks restrict the output of manufacturing systems and offer the greatest leverage for productivity. Therefore, the identification and elimination of bottlenecks is of great importance in order to ensure an efficient production. On the other hand, energy efficiency of plants is becoming more important over the last years. This paper shows how the methods for detecting shifting bottlenecks in manufacturing systems can be used to switch machines to an energy efficient state, without loss of production volume while reducing energy consumption.

1 Einleitung

Klimawandel, Ressourcenverknappung und steigende Energiepreise rücken den sorgfältigen Umgang und eine ressourcenschonende Nachhaltigkeit immer stärker in den Fokus der Gesellschaft. Diese gestiegenen Ansprüche tragen zu schärferen rechtlichen Vorschriften und einem stärker ökologisch motiviertem Marktverhalten bei. Durch diese Treiber erfährt die Betrachtung von Energiekriterien auch außerhalb der besonders energieintensiven Produktionsunternehmen eine zunehmende Relevanz bei der Planung und beim Betreiben von Fabriken (Müller et al. 2009). Dadurch muss nun ein zusätzlicher Aspekt neben den Schlüsselfaktoren Flexibilität und Produktivität unter Berücksichtigung der Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeit betrachtet werden, um auf heutigen kurzzyklisch schwankenden volatilen Märkten wettbewerbsfähig bleiben zu können. Entscheidend ist es weiterhin, primär Produktionszeiten und Liefertreue zu verbessern, ohne die Qualität und die Kosten zu vernachlässigen, jedoch mit möglichst energie- und ressourcenschonenden Einsatz.

Zur Planung von Produktionssystemen hat sich die Materialflusssimulation als Werkzeug im Rahmen der Digitalen Fabrik etabliert (Bracht et al. 2017; Pöge und Mayer 2013). In großen Unternehmen, insbesondere der Automobilindustrie, wird jede neue Produktion bzw. ganze Fabriken vor Bau und Inbetriebnahme mit der Simulation abgesichert, um geforderte Ausbringungsmengen zu erreichen. Durch die

Weiterentwicklung der Materialflusssimulation und der Integration von Energieaspekten können heute zuverlässige Energieprognosen der zukünftigen Produktion erfolgen.

Engpässe beschränken die Ausbringungsmenge des Gesamtsystems und bieten den größten Hebel zur Steigerung der Produktivität. Die Identifizierung und Beseitigung von Engpässen ist deshalb von erheblicher Bedeutung, um eine möglichst effiziente Produktion zu betreiben (Goldratt 1990). Dieses gilt ebenso bei der Betrachtung von Energieaspekten entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Dieser Beitrag zeigt auf, wie die systemtheoretischen Ansätze der Engpasstheorie bei der Analyse und Optimierung von Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation unter Einbeziehung des Energieverbrauchs eingesetzt werden können, damit Fertigungssysteme energieeffizienter die geforderten Ausbringungsmengen herstellen können.

2 Engpasstheoretische Grundlagen

Die Engpasstheorie besagt, dass der Durchsatz eines Systems ausschließlich von einem begrenzenden Faktor (dem Engpass) bestimmt wird (Goldratt 1990). Eine Verbesserung kann nur erfolgen, wenn das Gesamtsystem, ausgehend vom begrenzenden Faktor, übergreifend optimiert wird. Nach Goldratt's Theory of Constraints (TOC) (1990) erfolgt diese in fünf Schritten:

1. Identifizierung des Engpasses
2. Entscheidung über die optimale Verwendung des Engpasses
3. Unterordnung aller weiteren Prozesse unter den in 2. getroffenen Entscheidungen
4. Beseitigung des Engpasses
5. Nach der Beseitigung, starte erneut bei Schritt 1.

Zunächst wird der Engpass im Gesamtsystem identifiziert. Innerhalb von Fertigungssystemen geschieht dies häufig durch die Betrachtung von Beständen und Auslastungen der Maschinen. Anschließend erfolgen mit Fokus auf den Engpass Entscheidungen zur effizienten Nutzung, sodass dieser z. B. von Aufgaben, die nicht unbedingt im Engpass bearbeitet werden müssen, befreit wird. Darauf folgend werden alle übrigen Ressourcen/Prozesse den vorangegangenen Entscheidungen untergeordnet. Beispielsweise werden einem Fertigungssystem nur so viele Teile zugeführt, wie die kapazitätsbeschränkende Maschine abarbeiten kann, sodass die Bestände im System reduziert werden. Erst jetzt soll der Engpass z. B. durch die Anschaffung einer zusätzlichen Maschine behoben werden, da hiermit wesentlich höhere Kosten verbunden sind. Mit der Auflösung dieses Engpasses ist im Gesamtsystem an anderer Stelle zwangsweise nach obiger Deklaration ein neuer entstanden, den es nun beginnend mit Schritt 1 zu beheben gilt. Diese grundsätzlichen Regeln finden nicht nur bei der Überprüfung von Produktionsprogrammen Anwendung, sondern können vielfältig in Marketing, Vertrieb, Handel, Finanzen, Controlling oder Projektmanagement eingesetzt werden.

Damit ist ein Regelkreis zur iterativen, kontinuierlichen Verbesserung der Gesamtsystemleistung gegeben. Die Identifikation des Engpasses lässt die TOC aber offen. Kuo et al. (1996) zeigen auf, dass je nach Definition unterschiedliche Engpässe identifiziert werden können.

2.1 Identifizierung durch Blockade und Leerlaufen

Kuo et al. (1996) haben eine Methodik auf Basis der Betriebszustände „Blockiert“ (Blockage) und „Leergelaufen“ (Starvation) zur Engpassidentifikation in starr verketteten Fertigungssystemen, in welchen jede einzelne Maschine (alle mit gleicher Taktzeit) durch einen Puffer entkoppelt ist, entwickelt. Es werden Pfeile an allen Puffern entlang des Fertigungssystems in diejenige Richtung gesetzt, in welcher mit höherer Wahrscheinlichkeit ein Engpass auftritt (Abb. 1).

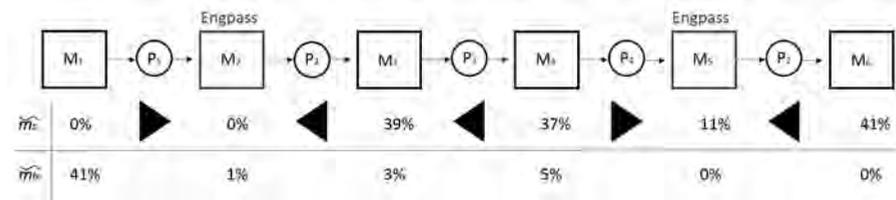


Abbildung 1: Engpassidentifizierung in verketteten Fertigungssystemen mit Pfeilregeln (in Anlehnung an Kuo et al. 1996)

Diese Engpassidentifikatoren werden durch folgende Regeln gesetzt:

- Ist die Wahrscheinlichkeit der Blockade von Maschine m_i größer, als dass Maschine m_{i+1} leerläuft, dann wird der Pfeil flussabwärts (nach rechts) gesetzt.
- Ist dagegen die Wahrscheinlichkeit des Leerlaufens von Maschine m_i größer als die Blockade von Maschine m_{i+1} , so wird der Pfeil flussaufwärts (nach links) gesetzt.

Eine Maschine wird als Engpass identifiziert, wenn beide angrenzenden Pfeile von beiden Seiten auf diese gerichtet sind (oder nur eine Seite für die erste und letzte Maschine). Mit dieser Methodik können entgegen der klassischen Engpasstheorie mehrere Engpässe gleichzeitig im Gesamtsystem auftauchen. Dabei hat derjenige Engpass den größten Schweregrad, der bei marginalen Produktionsratenänderungen den größten Einfluss auf die Gesamtproduktionsrate hat.

2.2 Bottleneck-Walk

Lorentzen (2012) und Roser (2015) benutzen ebenso Pfeile als Identifikatoren im sogenannten „Bottleneck-Walk“ zur Engpassidentifizierung. Dabei werden die Betriebszustände der Maschinen sowie die Pufferbestände in bestimmten zeitlichen Abständen während eines Rundgangs entlang der Fertigungslinie gesammelt (Abb. 2). An den Maschinen werden die Pfeile durch die Betriebszustände „Einlauf Leer“ und „Auslauf belegt“ gesetzt. Sie zeigen flussaufwärts, wenn nicht genügend Teile vorhanden sind und ein vorgelagerter Prozess dafür die Ursache ist. Dementsprechend zeigen Pfeile flussabwärts, wenn aufgrund nachfolgender Prozesse die Maschine blockiert ist. In den Zuständen „Gestört (Breakdown)“ und „Arbeitend (Processing)“ kann keine Aussage getroffen werden. Die Pfeile an den Puffern werden entsprechend ihrer Füllstände ausgerichtet. Die Grenzen für die Pfeilrichtung können dabei nach absoluten oder prozentualen Füllständen gesetzt werden.

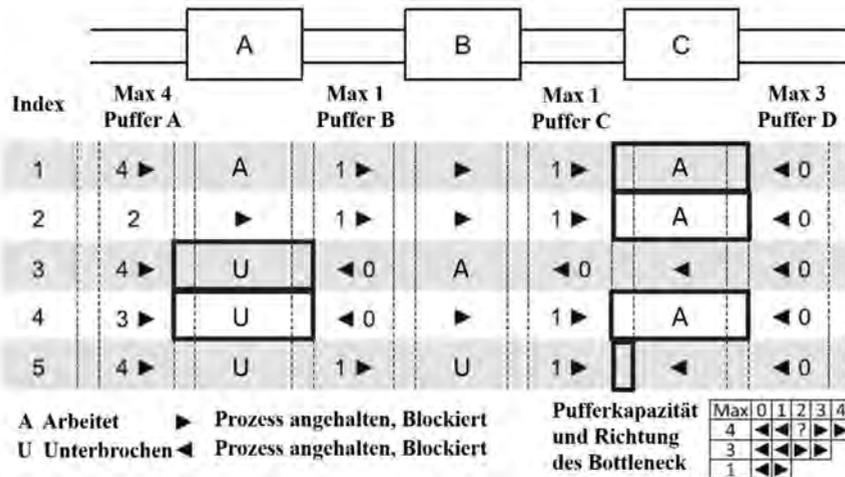


Abbildung 2: Bottleneck-Walk für ein Fertigungssystem

Ersteres bietet sich vor allem bei sehr kleinen Puffermaximalkapazitäten an. Es erfolgt nach oben und unten eine gleichmäßige Festlegung (z. B. Füllstand < 30 % oder > 70 %). Zeitlich treten Engpässe an verschiedenen Stellen im System auf. Über eine Analyse der Frequenz, mit welcher Häufigkeit Engpässe wo auftreten, können die kritischen Systembestandteile festgestellt und eine Priorisierung zur Behebung aufgestellt werden. Dabei helfen die gesammelten Betriebszustände, die Gründe für den Engpass zu bestimmen.

3 Energieorientierte Materialflusssimulation

Durch die einleitend aufgeführten Treiber sind Materialflusssimulationswerkzeuge in den letzten Jahren durch verschiedene Ansätze so weiterentwickelt worden, dass heute zuverlässige Energieprognosen für den Betrieb von Produktionssystemen gemacht werden können. Ein erster Ansatz erfolgte von Junge (2007), der verschiedene Systeme zur Stoff- und Energieflusssimulation von Maschinen mit der Materialflusssimulation durch eine Onlinekopplung kombinierte. Die Materialflusssimulation einer Produktion wird mit der thermischen Gebäudesimulation sowie eines dritten Simulators zur Berechnung der elektrischen Verbräuche gekoppelt, um eine energieeffizientere Produktionssteuerung und Prognose des Energiebedarfes der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zu ermöglichen. Dabei erfolgte die Berücksichtigung der Außen- und Hallentemperatur, der Lüftungsrate sowie der jeweiligen Schadstoffkonzentration in der Hallenluft. Thiede (2012) verfolgt ein ähnliches Ziel, indem er am Beispiel der Druckluftversorgung mehrere Simulationssysteme miteinander verbindet. In der Forschungsarbeit von Schacht (2014) wird der Einsatz der Energiesimulation im Planungsprozess des Karosserierohbaus beschrieben. Er koppelt dabei nicht mehrere verschiedene Simulationswerkzeuge, sondern integriert in eine bestehende Materialflusssimulationssoftware die Möglichkeit, Energieverbräuche von Maschinen und Anlagen abzubilden. Die Arbeit befasst sich hauptsächlich mit dem elektrischen Bedarf von Industrierobotern mit dem Ziel, die TGA besser dimensionieren zu können. Wolff et al. (2013) analysieren die Druckluft anhand der

Zylinderkopffertigung in einem Komponentenwerk der Automobilindustrie, ebenfalls integriert innerhalb eines Simulationssystems. Diese wenigen beispielhaft aufgeführten Forschungsarbeiten zeigen ein breites Spektrum an Möglichkeiten, Energieaspekte auf unterschiedliche Art und Weise mit der Materialflusssimulation zu kombinieren. Zu allen wichtigen produktionstechnischen Energiemedien wie Beleuchtung, Druckluft, Prozesswärme, Klima- und Lüftungstechnik sowie elektrischer Energie können zunehmend mehr Anwendungen gefunden werden. Der Fokus liegt hierbei auf der elektrischen Energie. Im Betrachtungsrahmen der elektrischen Energie kann grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Zielen beim Einsatz einer energieorientierten Materialflusssimulation nach Keller und Reinhart (2016) differenziert werden. Eine energieflexible Produktion zeichnet sich daraus aus, die benötigte Energie zum richtigen Zeitpunkt bereitzustellen. Ziel ist es durch organisatorische Maßnahmen oder technisch angepasster Systeme einzelne Produktionsprozesse aufgrund ihres prognostizierten Energieverbrauchs so anzustoßen, dass der gesamte Lastgang der Fabrik optimiert bzw. geglättet wird (Liebl et al. 2015). Auf der anderen Seite steht die Einsparung von Energie durch Effizienzmaßnahmen. Durch den optimierten Einsatz wird pro Produkt weniger Energie zur Herstellung benötigt. Die energieorientierte Materialflusssimulation kommt dabei während der Planung als auch zur Optimierung des Betriebes zum Einsatz. Als Vorreiter ist die Automobilindustrie zu nennen. Inzwischen setzt eine Vielzahl an Branchen die Materialflusssimulation zur Energieprognose ein. Wenzel et al. (2013) zeigen auf, wie eine ganzheitliche, durchgängig simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Automobilindustrie möglich ist.

4 Methodik zur energieorientierten Betrachtung von Engpässen

Die Methoden zur Engpassidentifizierung und -beseitigung werden hauptsächlich zur Verbesserung der Produktivität und Flexibilität unter dem klassischen Zielgrößendreieck Kosten, Zeit und Qualität zur Ausbringung einer bestimmten Produktionsmenge eingesetzt. Der Faktor Energie spielte hierbei bisher kaum eine Rolle. Die Ablaufsimulation ist ein Standardwerkzeug der Digitalen Fabrik und essentieller Bestandteil, um Kapazitäten und Bedarfe von Produktionen zu planen und zu prognostizieren. Mit ihr werden Anlagen optimiert und ausgetaktet und damit (indirekt) dynamisch auftretende Engpässe beseitigt, um geforderte Mengen auszubringen. Kaum eine Analyse/Simulation von Engpässen in Fertigungssystemen berücksichtigt dabei Energiefaktoren. Einen ersten Ansatz zeigen Seewaldt et al. (2017) am Beispiel des Karosserierohbaus auf. Bei Auftreten von Engpässen durch Störungen werden über eine intelligente Steuerung der Pufferbelegung vorangehende oder nachfolgende Stationen bei Eintreten bestimmter Ereignisse in einen energieeffizienteren Zustand (energiesparende Fahrweise, Standby oder Aus) versetzt. Dieses entspricht im Prinzip einer ähnlichen Vorgehensweise, unter Einbeziehung des elektrischen Verbrauches, wie in Abschnitt 2.1 und 2.2 aufgeführt. Jedoch werden keine Pfeile zur Engpassidentifizierung verwendet. In der Arbeit wird gezeigt, dass durch eine minimale Anpassung der maximalen Pufferkapazitäten und dem Einsatz einer energieorientierten Steuerung als Reaktion auf einen Engpass im laufenden Betrieb Energieeinsparungen möglich sind. Aus den Ausführungen kann geschlussfolgert werden, das allgemeine, nach oben und unten symmetrisch aufgestellte Regeln zum Setzen der Grenzen (vgl.

Abschnitt 2.2) in diesem Praxisbeispiel nicht zu den besten Ergebnissen führen. Für eine energieorientierte Betrachtung müssen mehr Betriebszustände als bisher üblich betrachtet werden, da in diesen unterschiedliche Energie verbraucht wird (Tab. 1). Dabei erfolgt der Bezug nur auf die Betrachtung der elektrischen Energie. Generell können durch geringe Anpassungen und Erweiterungen auch andere Energieformen entsprechend betrachtet werden.

Table 1: Energetische Betriebszustände (in Anlehnung an Kohl 2016)

Betriebszustand	Energetischer Lastfall
Arbeitend	Arbeitend
Energiesparend Arbeiten	Mit reduzierter Geschwindigkeit und geringerem Energieverbrauch arbeiten
Rüstend	Rüstend
Betriebsbereit	Wartend/Grundniveau
Blockiert	Blockiert/Grundniveau
Gestört	Gestört/Grundniveau
Standby	Zwischen Grundniveau und Aus
Aus	Aus

4.1 Vorgehensweise

Um mit der Ablaufsimulation Engpässe energieorientiert optimieren zu können, ist ein mehrstufiger Prozess notwendig:

1. Betrachtung des Gesamtsystems und Zusammenfassung der Bereiche und Maschinen zwischen Entkopplungspuffern
2. Ermittlung der Energiedaten
3. Simulationsmodellerstellung
4. Optimierung durch Simulation
 - Energiesparende Arbeitsgeschwindigkeit
 - Anlagenindividuelle Festlegung der Grenzen für die Engpassindikatoren
 - Kapazitätsanpassungen der Puffer (soweit real umsetzbar)

Durch die Erweiterung des Betrachtungsrahmens um Energieaspekte werden die Pfeilregeln vielschichtiger. Deswegen müssen die in Abschnitt 2.1 und 2.2 vorgestellten Identifikationsmethoden so angepasst werden, dass sie nun auch für eine energieorientierte Betrachtung genutzt werden können. Dabei ist es sinnvoll verschiedene Regeln einzuführen, je nachdem ob ein Engpass durch eine Störung hervorgerufen wird oder nicht.

Bei nicht störungsbehafteten Betrieb:

- Ist der aktuelle Bestand eines Puffers größer als ein vorher festgelegter Mindestbestand, so wird ein Pfeil flussaufwärts gesetzt.
- Fällt der Bestand unter ein bestimmtes Maß, so wird der Pfeil flussabwärts gesetzt.
- Bei einem Pufferbestand zwischen diesen beiden Grenzen kann keine Aussage getroffen werden.

Zeigen zwei Pfeile von beiden Richtungen auf einen Bereich, so wird dieser in den langsameren, energiesparenden Arbeitsmodus gesetzt, denn er würde bei voller Geschwindigkeit Gefahr laufen, den nachfolgenden Puffer komplett zu füllen und den vorgeschalteten leerlaufen zu lassen. Für den letzten und ersten Bereich einer Anlage erfolgt die Schaltung entsprechend der Stellung des einen angrenzenden Pfeiles. *Bei Auftreten einer Störung*: Ist der nachgeschaltete Bereich eines Puffers gestört, werden in beide Richtungen gegenüber dem nicht störungsbehafteten Betrieb priorisierende Pfeile gesetzt und die nachfolgenden und vorangelagerten Bereiche in den energiesparenden Arbeitsmodus versetzt. Damit ist gewährleistet, dass die Anlage auf möglichst energieeffiziente Weise vor der Störung bis zur Blockade und dahinter bis zum Leerlaufen arbeitet. Sobald diese geschehen ist, werden die Anlagen in Standby versetzt und bei Behebung der Störung zeitlich passend wieder hochgefahren.

4.2 Analyse des Systems

In modernen Fertigungssystemen (z. B. im Karosserierohbau) sind nicht alle einzelnen Maschinen, wie von Kuo et al. (1996) (vgl. Abschnitt 2.1) gefordert, jeweils durch Entkopplungspuffer getrennt. Stattdessen sind sie in einzelnen Bereichen gegliedert und agieren z. B. als eine Einheit in einem Schutzkreis. Um Pfeile als Engpassidentifikatoren anwenden zu können, müssen deshalb Maschinen und/oder Bereiche zwischen den Entkopplungspuffern zusammengefasst werden, sodass übergreifend ein wertschöpfendes Netzwerk von direkt aufeinanderfolgenden Puffern und Maschinen/Bereichen entsteht. Dieses kann im Simulationsmodell durch die Benutzung von Unternetzwerken erfolgen, sodass im Detail jede einzelne Maschine weiterhin abgebildet ist, jedoch im Hauptnetzwerk des betrachteten Systems die geforderte Struktur für die Benutzung von Pfeilregeln vorhanden ist (vgl. hierzu auch die Ausführungen zu einer hierarchischen Modellstruktur von Kohl 2016).

4.3 Bestimmung der Energieverbräuche in den Betriebszuständen

Über jeder Energieeffizienzmaßnahme steht die geforderte Qualität des Produktes. Ist es technisch nicht möglich, langsamer und energiesparender alle prozesstechnischen Ansprüche zu erfüllen, so darf dieser Anlagenteil nicht energiesparend produzieren. Stattdessen wird normal produziert und anschließend betriebsbereit gewartet, während andere Maschinen im Energiesparmodus arbeiten. Viele Einzelbestandteile von Fertigungssystemen arbeiten zudem nicht die volle Zeit. Hier muss individuell der Energiesparmodus festgelegt werden. Eine besondere Schwierigkeit stellt momentan weiterhin die zuverlässige Datenbasis von Energieverbräuchen der Maschinen dar. Verschiedene Varianten und Fertigungsschritte lassen selbst auf gleichen Maschinen individuelle Lastkurven entstehen. Auch in anderen Simulationswerkzeugen werden Energieprognosen für Maschinen mit eingebunden. So können für aktuelle Industrieroboter genaue Energieprognosen für verschiedene Beschleunigungen, Verfahrensgeschwindigkeiten und Bahnkurven simulativ ermittelt werden (Quelle). Damit können aufwendige reale Messungen, die bei Planungen von Anlagen noch gar nicht vorliegen können und deshalb auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden muss, vermieden werden können.

4.4 Simulationsmodellerstellung

Allgemeine Vorgehensweisen und Techniken bei der Modellerstellung sind nicht Hauptbestandteil dieses Beitrags. Auf vertiefende Informationen sei hierzu insbesondere auf Schacht (2014) verwiesen. Die Pfeile sollten auch visuell in das Simulationsmodell integriert werden. Für den Anwender wird somit die Transparenz dieser Methodik erhöht sowie deren Nutzeneffekte besser deutlich gemacht. Für die Optimierung des Simulationsprozesses selbst ist es wichtig, über passende Schnittstellen die Energieverbräuche einzelner Maschinen aus anderen Simulationswerkzeugen oder realen Messungen direkt in die Ablaufsimulation z. B. über Datenbanken einzubinden, sodass der Anwender hierfür neben der eigentlichen Modellerstellung keinen Mehraufwand betreiben muss.

4.5 Energieorientierte Engpassoptimierung

Es stehen grundsätzlich unterschiedliche Parameter zur energieorientierten Engpassoptimierung zur Verfügung:

- Festlegung der Arbeitsgeschwindigkeit im Energiesparmodus
- Grenzen für die Regeln zum Setzen der Pfeile
- Anpassung der maximalen Pufferkapazitäten

Diese Freiheitsgrade haben gegenseitig direkten Einfluss aufeinander und beeinflussen aus der Kombination ihrer Einzelausprägungen in Gesamtheit das Ergebnis. Sie können deswegen nicht einzeln voneinander getrennt betrachtet werden. Damit entsteht aus den geforderten Rahmenbedingungen und den technischen Möglichkeiten ein Minimierungsproblem:

„Finde diejenige optimale Kombination aus Arbeitsgeschwindigkeit im Energiesparmodus, Regeln für die Engpassidentifikatoren und den maximalen Pufferkapazitäten, sodass die verlangte Ausbringungsmenge mit minimalem Energieverbrauch hergestellt werden kann.“

Um den Aufwand zur Feststellung der optimalen Kombination zu verringern, sollten in Voruntersuchungen Schranken für den Betrachtungsrahmen der energiesparenden Arbeitsgeschwindigkeit und den möglichen maximalen Pufferkapazitäten festgelegt werden. Bei der Analyse von bereits real gebauten Anlagen wird in der Regel eine Änderung der Pufferkapazitäten ausgeschlossen, da diese Umbaumaßnahmen nur mit einem hohen Aufwand, die in keinem Verhältnis zur Energieeinsparung stehen, möglich sind. Des Weiteren unterliegen sie technischen und wirtschaftlichen Maximalgrößen. Durch die simulative Absicherung der Austaktung einer Anlage ohne Berücksichtigung von Energieverbräuchen kann die untere Schranke zur Dimensionierung der maximalen Pufferkapazität vorab festgelegt werden. Entsprechend kann die obere Schranke durch technische und wirtschaftliche Gegebenheiten ebenfalls festgelegt werden. Insgesamt kommt damit immer noch eine Vielzahl an möglichen Lösungsvorschlägen zustande. Hier bieten aktuelle Materialflusssimulationswerkzeuge wie Plant Simulation die Option, durch den Einsatz von genetische Algorithmen eine gute Lösung zu finden. Als Fitnesswert kann der Energieverbrauch alleine oder gewichtet mit der Summe an Pufferkapazitäten benutzt werden.

5 Anwendungsfall

Die vorgestellte Vorgehensweise wird im Folgenden anhand eines repräsentativen Teilbereichs des Karosserierohbaus in der Automobilbranche vertiefend dargestellt. Dieser besteht aus ca. 70 fertigungstechnischen Einzelsystemen von Industrierobotern zum Schweißen und Transportieren von Teilen, Klebeeinheiten sowie Falzstationen. Diese sind in fünf Bereichen getrennt, die über vier Entkopplungspuffer mit einer Kapazität von sechs Einheiten getrennt sind. Durch Voruntersuchungen kann für die Bereiche eine sinnvolle Untergrenze von 80 % der normalen Geschwindigkeit für eine energiesparende Arbeitsweise ermittelt werden. Damit ergibt sich bei einer Austaktung von 60 s eine Taktzeit im Energiesparmodus von maximal 75 s. Untersucht wird in der Simulation die Erhöhung der Taktzeit im Sparmodus in Schritten von 1 s. Die aus technischer Sicht maximale Größe eines Puffers beträgt 10 Einheiten. Gefordert wird eine durchschnittliche Ausbringungsmenge von 52 Teilen pro Stunde, die ohne Energiesparmaßnahmen erbracht wird. Die Grenzen der Pfeilregeln werden ebenfalls in Schritten von 1 untersucht. Ergebnisse verschiedener Optimierungsmöglichkeiten zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse

Szenario	Pufferkapazitäten	Pfeile (Min/Max)	Takt Sparmodus	Output/h	Energiebedarf pro Teil
1	6	-	-	52,04	100 %
2	6	1/2	75s	50,01	97,1 %
3	10	-	-	54,01	98,9 %
4	7	2/4	71s	52,06	96,1 %
5	10/9/10/10	2/7	75s	53,69	93,9 %

Die Ausgangsergebnisse ohne Energieoptimierungen sind in der ersten Zeile dargestellt. Es konnte bei gleichbleibenden maximalen Pufferkapazitäten keine Lösung gefunden werden, die die geforderte Ausbringungsmenge erbringt, gefunden werden. Die Energiesparmaßnahmen zeigen immer eine Reduzierung der Gesamtausbringungsmenge in diesem Beispiel (Szenario 2). Eine Erhöhung der Pufferkapazitäten ist unumgänglich. Szenario 4 zeigt eine gefundene Parameterkombination, die bei einer schon kleinen Erhöhung von 6 auf 7 Pufferplätzen die gleiche Ausbringungsmenge fertigt und dabei ca. 4 % weniger Energie verbraucht. Die beste gefundene Lösung mit dem genetischen Algorithmus ist in der letzten Zeile aufgeführt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass mit der vorgestellten Methodik die auf Energieaspekte angepassten, engpasstheoretischen Ansätze sinnvoll in der Materialflusssimulation eingesetzt werden können, um Fertigungssysteme planen und optimieren zu können. Am Praxisbeispiel wird aufgezeigt, dass mit den neuen Regeln zur energieorientierten Engpassidentifizierung Einsparpotenziale gefunden werden können. Dies hat jedoch Konsequenzen auf die Dimensionierung von Entkopplungspuffern.

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen sind weitere Untersuchungen zur energieorientierten Identifizierung von Engpässen angestrebt. Zum einen gibt es noch weitere, bisher nicht betrachtete Methoden zur Identifizierung von Engpässen. Diese sollten auf ihre Tauglichkeit zum Einsatz in der beschriebenen Methodik analysiert werden. Zum anderen bietet sich die Vorgehensweise nicht nur für die Untersuchung von starr verketteten Fertigungssystemen an, sondern kann auch auf andere Systeme wie z. B. flexible Fertigungssysteme mit Verzweigungen oder Rückläufen im Fertigungsprozess angewendet werden.

Literaturverzeichnis

- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele - Eine Basis für Industrie 4.0. Berlin: Springer 2017 (im Druck).
- Goldratt, E.M.: What is this thing called theory of constraints and how should it be implemented? Croton-on-Hudson, N.Y: North River Press 1990.
- Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: Kassel Univ. Press 2007.
- Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 244-249.
- Kohl, J.: Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik. Dissertation, 2016.
- Kuo, C.-T.; Lim, J.-T.; Meerkov, S.M.: Bottlenecks in serial production lines: A system-theoretic approach. *Mathematical Problems in Engineering* (1996) 3, S. 233-276.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen. *wt Werkstatttechnik Online* 105 (2015) 3, S. 136-140.
- Lorentzen, K.A.: Systematische Variabilitätsreduktion zur kontinuierlichen Verbesserung von Fließlinien. Aachen: Shaker 2012.
- Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- Pöge, C.; Mayer, C.: Quo vadis Ablaufsimulation - Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013*. Paderborn: W.V. Westfalia Druck GmbH 2013, S. 11-20.
- Roser, C.; Lorentzen, K.; Deuse, J.: Reliable shop floor bottleneck detection for flow lines through process and inventory observations. *Logistics Research* 8 (2015) 1, S. 443.
- Schacht, M.: Erweiterung des Planungsprozesses im Karosserierohbau um Energieaspekte zur Auslegung der technischen Gebäudeausrüstung. Aachen: Shaker 2014.
- Seewaldt, M.; Nagel, J.; Bracht, U.; Geckler, D.: Energy-oriented material flow simulation as a contribution to automotive industry 4.0 (accepted 25.06.2017). Erscheint in: *Simulation News Europe* 27 (2017) 2.
- Thiede, S.: *Energy efficiency in manufacturing systems*. Berlin: Springer 2012.
- Wenzel, S.; Junge, M.; Pöge, C.; Spieckermann, S.: Energieeffizienz in der Automobilindustrie - Ganzheitliche simulationsgestützte Planung und Bewertung. *Productivity Management* 18 (2013) 4, S. 21-24.
- Wolff, D.; Kulus, D.; Nagel, J.: Simulationsgestützte Bewertung von Energiesparstrategien. *ZWF* 108 (2013) 3, S. 103-108.

Flexibilization of Energy Supply Using the Example of Industrial Hall Climatization and Cold Production

Flexibilisierung der Energieversorgung am Beispiel der industriellen Hallenklimatisierung und Kälteerzeugung

Tobias Heidrich, Heiko Dunkelberg, Tim Weiß, Jens Hesselbach, Universität
Kassel, Kassel (Germany), heidrich@upp-kassel.de, dunkelberg@upp-kassel.de,
weiss@upp-kassel.de, hesselbach@upp-kassel.de

Abstract: Industrial companies need to measure, evaluate and predict their energy demand to use this knowledge to improve plant control and achieve further energy efficiency. Within the framework of the contribution, two model cases from the food and plastic sector are described, which implement the concepts of a "smart consumer" with the focus on demand-side management and smart control approaches. Simulations show how improved operation of the technical building infrastructure saves energy by using the example of a hall climate control and refrigeration. In addition, the specific energy-saving measures are described and the future realization potential is discussed.

1 Introduction and Problem Definition

Because of the intensified expansion of renewable energies in the course of the German "Energiewende", the energy supply structure is faced with decisive changes and new challenges (BMW 2015).

Based on an increasingly decentralized, volatile, renewable energy supply, the load on the lower grid levels is increasing, resulting in bi-directional energy flows along the vertical grid structure (Scholz et al. 2012). In order to stabilize the grid, industrial energy consumers increasingly appear as intelligent energy consumers and producers, without losing the goal of increasing primary energy efficiency.

Companies act as intelligent consumers and producers, so-called smart industrial consumers, in a smart grid. They are an important keystone for the success of the energy transition. The advances in technological development are also leading to an ever-increasing role for the conversion and implementation of energy-efficient, grid-based energy supply infrastructures in the industrial environment. For this transformation process automation, energy data collection and digital networking is required.

The preconditions for the development of a Smart industrial Consumer consist in the continuous knowledge of all relevant energy flows, their evaluation, as well as their prediction depending on production programs and ambient conditions (e. g. weather) as well as in the option of intervention by superior control technology.

2 State of Research

Mathematical, simulation based optimization algorithms targeting an improved building climatization including air conditioning units are described in several ways. An example is given by the publication of He et al. (2014) which is minimizing the energy demand of climatized rooms using “particle-swarm-optimization”. Wang et al. (2011) consider besides the energy efficiency also the comfort field and Tejada (2012) as well as Oldewurtel et al. (2012) are using model predictive controls (MPC). However, previous work regarding the topic of optimized operation through superior controls often just refer to single units or in composited units to simulative studies without a direct practical implementation in the industrial environment. In combination with a complex energy monitoring system, the implementation of modern air conditioning techniques and an optimized and combined unit control system does not exist in this dimension and complexity. Models for the simulation of industrial halls and thermal loads (Schäfer et al. 2012) as well as the probabilistic construction of production schedules (Dunkelberg et al. 2017) are available.

Scientific explorations regarding the issue of grid stability by demand-side management and reaction of market price signals by smart consumers are given for example in Schultz et al. (2016) and Krzikalla et al. (2013).

3 Approach

In order to make changes in the operating mode of plants, by using new technologies or the conversion of the energy supply, predictive and physical models (models for buildings, refrigeration plants, injection moulding machines, ventilation and air conditioning systems) are built. Real measuring results such as internal loads, weather data (radiation and ambient temperature), as well as real production plans are integrated into these models to provide practical information about the modification, operating mode changes and energetic interaction under varying conditions. The complexity of the non-stationary energetic and dynamic technical connections requires the application of a simulation tool, which fulfils the requirements in a high quality. The simulation software MATLAB® / SIMULINK® fits this purpose.

The aim of the simulations is to adapt the calculated, improved operating modes to the real systems via a suitable IT infrastructure (like sFTP server, OPC interface) in the future. Furthermore, efforts are being made to replace the simulation results successively and automatically with real measurement data using the principle of self-learning characteristics or fields from the energy monitoring system.

4 Model Description

Two existing companies with all relevant plants and energy data are available for the investigation. For both cases the air-condition-units were built based on the Mollier-

h-x-diagram, the building models consists of a layer model of linked ordinary differential equations (Wagner et al. 2014; Schäfer et al. 2012) and the energy supply models use characteristic diagrams. All of the used simulation models were validated by real measurements on a laboratory scale or by measurements in the companies.

4.1 Case 1: The Food Company

Companies in the field of food processing set high demands on hygiene and adherence to given ambient conditions. Due to process-specific requirements, the considered confectionery manufacturer places particularly strict requirements on air conditioning. In particular, the packaging area of chocolate bars is a sensitive area in which air conditioning is needed. The prevailing air temperatures of the direct product air conditioning system must never exceed 18 °C to rule out deformations of the chocolate. Additionally, the relative humidity must always be kept below 50 % to avoid condensation effects on the chilled chocolate surface. (Wagner et al. 2014) Compliance with the requirements is achieved by a novel displacement ventilation successfully tested in the laboratory where the product is guided through a local “lake” of conditioned air. This variant’s functionality has further been confirmed by extensive computational fluid dynamic simulations (CFD). Therefore the air conditioning of the other production hall can be adapted to the needs of employees. As a result, the temperature and moisture content values can be extended within the comfort range from 16 to 24 °C as well as relative humidity between 35 % and 65 %, enabling high energy savings of up to almost 50 %. (Heidrich 2016; Schirmer et al. 2016; Wagner et al. 2014).

The air conditioning is carried out in the model case via two air-conditioning units, which are supplied with cold water by compression cooling machines and steam by a steam generator for humidification. As shown in Figure 1, a HVAC system ensures the air conditioning of the conveyor belt cooling while the other conditions of the remaining production hall.

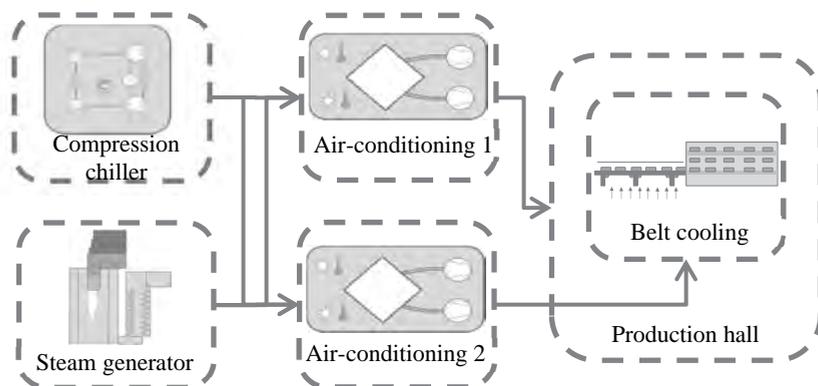


Figure 1: Schematic model of the food company

Due to the described conversion to an extended temperature and humidity range within the comfort field in the production hall the control offers a greater scope of the air-conditioning’s operation mode. This enables a grid friendly system operation

and the use of fluctuating electricity prices. Furthermore, energy can additionally be saved via an adapted, production-schedule-dependent start-up logic of the air-conditioning system, which ensures the required air conditions in the hall at the start of production. For example, previously scheduled, rigid switch-on times of the HVAC system, in this case 8 hours before production start, can be replaced by variable switch-on times depending on the boundary conditions.

4.2 Case 2: The Plastic Fabricator

The plastic company considered produces injection moulded parts for the food sector. High hygiene requirements are applied to the production hall as well.

The injection moulding machines are cooled continuously. Two different cooling circuits are installed. On the one hand the mould cooling circuit at a temperature level of about 14 °C and a machine cooling at about 30 °C. The refrigeration of the mould circuit is carried out by means of EER-optimized compression chiller machines and a dry cooler which is also used for winter relief. The cooling of the machines is provided by cooling towers. The plant scheme is shown in figure 2.

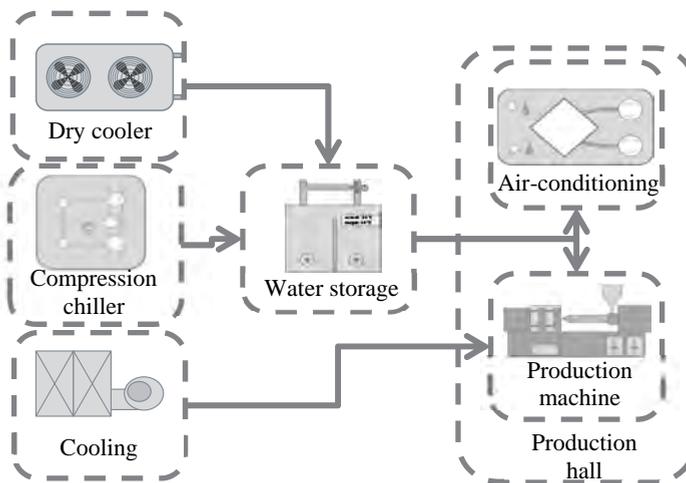


Figure 2: Schematic model of the plastic fabricator

Due to high internal loads, an intensified cooling of the production hall especially in summer is necessary to avoid machine failures and to maintain an acceptable temperature level for the plant operators. Often a simple mixed- or window ventilation is used. For these requirements, a ventilation with temperature conditioning is necessary in model operation. A controlled layer ventilation system is used to save energy.

The air is tempered in the need of cooling by the inlet of the refrigeration of the mould cooling circuit. In the case of heating, the return of the machine cooling is used to heat up the air. At the same time the cooling towers are relieved.

Cooling circuits are recirculated via the air-conditioning system. At the same time, there is a direct dependency between the air-conditioning system and the respective

refrigeration circuits. This leads to an increase in the degree of complexity, especially since the control of the air conditioning is directly dependent on the production, i.e. the input of loads into the environment as well as into the cold system.

4.3 Scenario Description

For the investigations, an initial scenario and three study scenarios are considered for each model case.

Reference scenario: Displays the control output status without simulation-based, improved operating modes and provides information on the initial energy situation.

Scenario I: Investigates the effects of an optimized start-up behaviour on the energy demand.

Rigid start-up times of the HVAC system are replaced by calculated, optimized and the starting conditions (indoor temperature, outdoor temperature) adapted switch-on times. Figure 3 shows the calculated, physically necessary start-up times for the model case of the food company with a target temperature of 18 °C at the start of production in order to achieve the required hall temperature under different conditions. For the simulation, a safety margin of 15 min. is also calculated to the start-up time in order to be able to react to fluctuating boundary conditions.

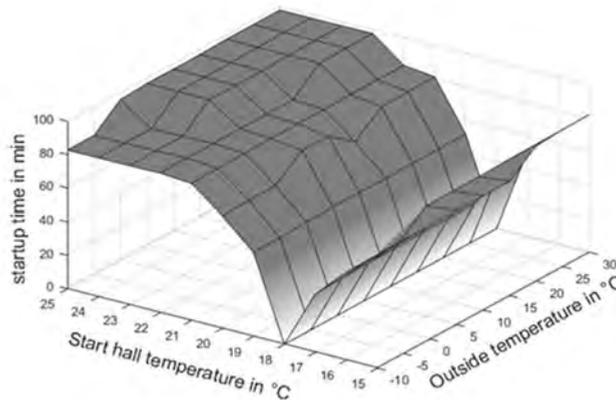


Figure 3: Simulated start-up times at a hall temperature of 18 °C depending on the indoor and outdoor temperature for the food processor

Scenario II: Investigates the effects on the energy requirement, the energy consumption costs, as well as the grid behaviour by setting a temperature range in the cold water systems.

For the plastic fabricator, this means the implementation of a sliding set-point change of the refrigerant circuits within a temperature range. For the cooling of the mould, nominal temperatures between 12-15 °C and for machine cooling 25-30 °C are possible. In addition, a dew point control is implemented which limits a drop in the flow temperature. In the case of the food company, a variable flow temperature control in the cold water system for the supply of the air-conditioning system -

within the limits of the Mollier diagram - replaces a rigid cold water temperature setting of $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

In order to establish variable set-points within the respective temperature limits under ecological aspects, a method for the evaluation of variable current prices has been developed. This includes the fact that the Day-Ahead hour contracts from 2006 to 2016 are approached by a standard normal distribution. The integral of this function is also used as an allocation function for the predetermined temperature limits.

In order to evaluate the current electricity price, its deviation from the daily mean value is formed and inserted into the normalized distribution function from Figure 4.

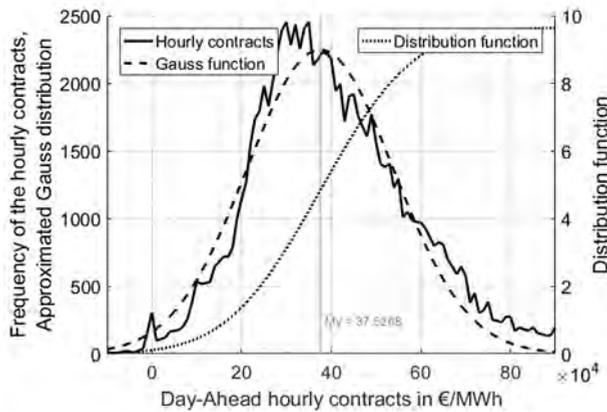


Figure 4: Distribution of Day-Ahead hour contract from 2006 to 2016 with the approximated Gaussian distribution and the associated distribution function

Negative values indicate favourable, positive values accordingly for expensive electricity prices. This evaluation normalized to the interval $[-1; 1]$ is applied to the temperature limits and a set-point temperature dependent on the current price is set.

Since the re-cooling units only have different power values when the nominal temperature is changed, the normalized current price evaluation is delayed by an integral.

Scenario III: Shows the effects of changing the nominal air temperature in the production area to the energy requirement, the energy reference costs as well as the electric grid behaviour. Extension of the comfort field control to the consideration of the current grid situation.

5 Presentation of Results

Scenario I: Optimized start-up time

Compared to the reference scenario the optimized start-up time of the air conditioning system allows the unit to start several hours later. This difference is shown clearly by looking at the total power consumption in Figure 5. The areas between the graphs point out the potentials of energy savings.

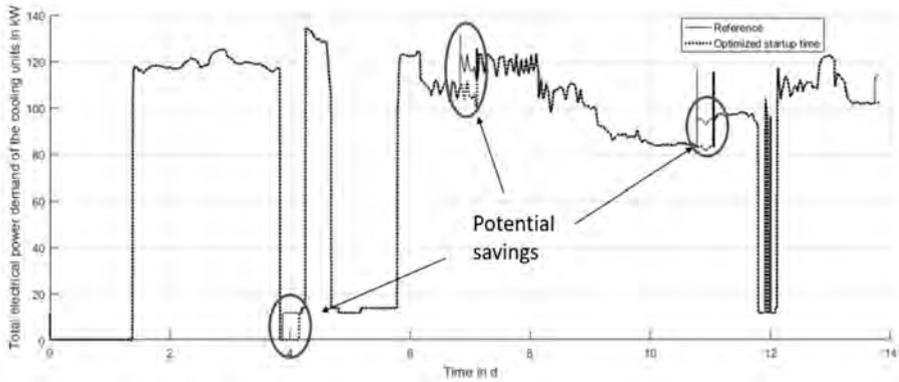


Figure 5: Total electrical power consumption of the air conditioning system in the reference scenario compared to the optimized start-up time scenario in winter for the food production plant

The specific energetic saving potential over two reference weeks in different seasons is displayed in table 1.

Table 1: Comparison of the energy consumption over two weeks with and without optimized start-up time of the air conditioning unit for the food production plant

	Reference in MWh	Optimized start-up time in MWh	Energy savings in MWh
Summer	32.51	31.79	0.71
Transition period	28.17	27.81	0.36
Winter	28.63	28.37	0.25

Since the heat supply of the HVAC unit in the second model case is depending on the machine cooling circuit and cooling is only needed if machines are running, the HVAC unit starts with the production and an optimized start-up time can only be implemented after modifying the machine constellation.

Scenario II: Variable set point temperature of the cooling water circuit

Figure 6 shows on the example of the manufacturer of plastics processing plant the difference between the total power consumption of the chillers including the affiliated pumping systems in the electricity-price-adapted scenario in comparison to the reference scenario in dependency of the current electricity price.

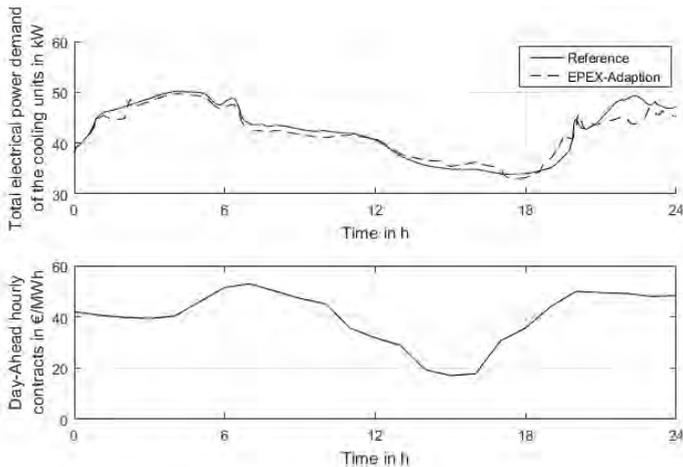


Figure 6: Comparison of the total power consumption of the chilling units in the reference scenario and the electricity price driven control

Thus, up to 5 % of the chilling power consumption can be shifted to benefit from cheap electricity prices and to in- or decrease the load of the power grid respectively. Since in this model a dry cooling unit is used the flow temperature in some cases, especially at warm outside temperatures, cannot be set to the lower limit without causing a significantly higher energy demand by the compression chiller unit. Thereby the flexibility in winter is higher than in summer.

A variable cold water flow temperature for the supply of the air conditioning unit of the food manufacturer is saving energy in the lower one-digit percent region. Due to the higher EER of the compression chiller unit at higher flow temperatures the electricity demand can be

Scenario III: Variable hall temperature

There is the possibility to vary the hall temperature and thus using the production hall itself as a thermal storage system as well. In the case of the plastic manufacturer the required heat for the air conditioning system is provided by the return of the hydraulics cooling circuit, decreasing the load of the cooling towers. Respectively a lower hall temperature increases the load of the compression chiller units in case of cooling the air. An electricity price dependent hall temperature causes in these cases a temporarily shift of the cooling power demand, but simultaneously causes a significantly higher energy demand which affects the overall balance negatively.

In the case of the food manufacturer the heating and cooling power is directly related to heating- and cooling units, so the effect shown by the plastic processing company does not occur in this case. However, in both cases the production hall provides such a low thermal storage potential that the impacts on the cooling systems are marginal. To provide additional flexibility the deployment of thermal water storages should be analysed.

Overall this analysis shows energy saving potential through the implementation of optimized start-up time by little effort and without affecting the production.

Furthermore, cooling circuits can be used as thermal storages by varying the flow temperature to in- or decrease the grid load and possibly benefit of low electricity prices. However, the potential of savings and realization of the operating optimizations depend greatly on the existing unit and production constellations, as shown in table 2 for the two example scenarios.

Table 2: Assessment of the suitability of the optimization approaches (+: high, o: average, -: low)

Evaluation target	Plastic processing plant	Food manufacturing plant
Start-up time	o	+
Variable cooling water flow temperature	+	+
EPEX energy price depending hall temperature	o	o

6 Conclusion and Future Outlook

The results of the simulative analysis show an energetic saving potential for the companies which is theoretically feasible through optimized controls. Furthermore, the plants can switch to a grid-driven control of the units in the future by operating cooling and climatization units at variable temperatures. Since there can be shifted up to 5 % of the cooling power demand in the case of the plastic processing plant, fluctuations in the grid due to volatile electricity feed of renewable energies can be compensated by the intelligent operation of the units and by that contributing to the reduction of greenhouse gases. Since fluctuations in the electricity grid are related to the electricity price, there are additionally financial saving potential for companies.

Expanded with self-learning characteristic curves and predictive controls which is based on forecasted energy demands, weather and electricity prices a flexible unit operation will be implemented in practice. Through the installed energy monitoring system in both plants real time values about the energetic situation and the production schedule will be processed in the simulation. Combined with weather and electricity price predictions the optimal operating states can be determined.

A possible dynamic renewable energy levy (EEG levy), which significantly extends the peaks of the electricity price (Agora 2014), increases the financial incentive for companies to invest in flexible techniques.

Acknowledgment

The contents of this paper have been acquired within the cooperation project „Smart Consumer – Energieeffizienz durch systemische Kopplung von Energieströmen mittels intelligenter Mess-, Steuer- und Regeltechnik“. The Project is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (FKZ: 03ET1180).

References

- Agora Energiewende: Der Spotmarktpreis als Index für eine dynamische EEG-Umlage. Agora Energiewende, Berlin 2014.
- BMWi: Die Energie der Zukunft. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Berlin 2015.
- Dunkelberg, H.; Meschede, H.; Stöhr, F.; Hesselbach, J.: Assessment of influencing factors in decentralized energy supply of manufacturing industries using probabilistic methods. Appears in: *Simulation Notes Europe 27 (2017) 2*.
- He, X.; Zhang, Z.; Kusiak, A.: Performance optimization of HVAC systems with computational intelligence algorithms. *Energy and Buildings 81(2014)*, pp. 371-380.
- Heidrich, T.: Energieeffizienzsteigerung in der Süßwarenindustrie durch lokale Klimatisierung und systemische Kopplung von Energieströmen. DLG session - innovative energy technologies in the food industry, Hannover 2016.
- Krzikalla, N.; Achner, S.; Brühl, S.: Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien. Study for the Federal Association of Renewable Energy, 2013.
- Oldewurtel, F.; Parisio, A.; Jones, C. N.; Gyalistras, D.; Gwerder, M.; Stauch, V.; Lehmann, B.; Morari, M.: Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings 45 (2012)*, pp. 15-27.
- Schäfer, M.; Wagner J.; Schlüter, A.; Hesselbach, J.: Energy Flows in Industrial Buildings and Machines using the Example of a Node Model. *Simulation Notes Europe 22 (2012) 1*, pp. 1-6.
- Schirmer, S.; Heidrich, T.; Wagner, J.; Hesselbach, J.: Steigerung der Energieeffizienz einer klimatisierten Produktionshalle. HLH 2016, pp. 38-40.
- Scholz, B.; Rißland, V.; Sauer, M.: Smart Grids in Deutschland. Federal Association of the Energy and Water Management (BDEW), Berlin, 2012.
- Schultz, C.; Braun, S.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration of Load Management into an Energy-oriented Production Control. 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 3-5th October 2016, Stellenbosch, South.
- Tejeda, G.; Cipriano, A.: A Hybrid MPC Optimization approach for HVAC Direct Load Control. 15th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization, The International Federation of Automatic Control, Rimini, Italy, 13-16th September, 2012.
- Wang, Z.; Dounis, A. I.; Lingfeng, W.; Yang, R.: An Information Fusion Based Multi-Agent Control System for Indoor Energy and Comfort Management in Smart and Green Buildings. *The Electrification of Transportation & the Grid of the Future*, Detroit, 2011.
- Wagner, J.; Dunkelberg, H.; Schlüter, A.; Phan, L.; Hesselbach, J.: Decreasing the Primary Energy Demand in the Plastics Industry by Modifying and Linking Energy Flows. ASHRAE Annual Conference, St. Louis, 2016.
- Wagner, J.; Schäfer, M.; Schlüter, A.; Harsch, L.; Hesselbach, J.; Rosano, M.; Lin, C.: Reducing energy demand in production environment requiring refrigeration – a localised climatisation approach. *HVAC&R Research 2014*, pp. 628-642.

Modellierung von volatilen erneuerbaren Energieerzeugern und Energiespeichern in Siemens Plant Simulation

Modelling of Volatile Renewable Energy Sources and Energy Storages in Siemens Plant Simulation

Johannes Stoldt, Bastian Prell, Andreas Schlegel, Matthias Putz, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany),
johannes.stoldt@iwu.fraunhofer.de, bastian.prell@iwu.fraunhofer.de,
andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de, matthias.putz@iwu.fraunhofer.de

Abstract: The realisation of the European Union's environmental aims results in an ever-greater reliance on volatile renewable energy sources. This translates into increasingly complex interactions on the energy markets, where industry companies must consider self-provisioning of energy, volatile prices and time-dependent energy availability for their operations. Simulation is the tool of choice to investigate the intricate interrelations between production and energy consumption. It needs to be readied for new questions related to the above developments. This paper presents an extension to the eniBRIC class library for Siemens Plant Simulation that allows for modelling volatile renewable energy sources as well as energy storages. To support their utilisation, a so-called Energy Supply Manager with brokering capabilities was developed. Its functionality has been tested successfully in a small example model.

1 Einleitung und Motivation

Bis 2030 will die Europäische Union (EU) Treibhausgasemissionen um 40 % verglichen mit dem Stand von 1990 reduzieren, den Anteil der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen auf 27 % steigern sowie die Energieeffizienz um mindestens 27 % erhöhen (Europäische Kommission 2016). Die EU-Mitgliedsstaaten stehen dazu in der Pflicht, Maßnahmen umzusetzen, mit denen sich diese Ziele erreichen lassen. Mit dem Ziel eines Versorgungsanteils von 50 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Quellen bis 2030 nimmt Deutschland eine Sonderrolle innerhalb der EU ein (Statista 2016). Daraus resultiert ein immer komplexeres Spannungsfeld für die Interaktion von Energieverbrauchern, -netzbetreibern und -erzeugern. Eine Leitfrage dabei ist: Zu welchen zeitlich bestimmten Konditionen und Umfängen können Anbieter und Nachfrager Energie über Versorgungsnetze, Marktplätze sowie dezentrale Speicher und Energiequellen bereitstellen bzw. beziehen?

Der vorliegende Beitrag stellt ausgehend von dieser Fragestellung ein Konzept zur Modellierung von volatilen erneuerbaren Energiequellen und Energiespeichern sowie eine Implementation ebendieser Elemente vor. Hiermit soll es möglich werden, die vorangehend aufgeworfene Frage mittels Simulation, speziell in der Software Siemens Plant Simulation, zu untersuchen. Hinleitend dazu wird im Folgenden zunächst der Stand von Wissenschaft und Technik dargestellt. Im Weiteren wird das Modellierungskonzept in Abschnitt 3 vorgestellt. Abschnitt 4 fasst die entwickelten Erweiterungen für die Klassenbibliothek eniBRIC überblicksweise zusammen. Deren funktionale Überprüfung wird in Abschnitt 5 thematisiert.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Motiviert durch die eingangs beschriebenen Entwicklungen, aber auch durch die damit einhergehende Inflation der Energiekosten, setzen Produktionsunternehmen zunehmend auf den Betrieb eigener dezentraler Energiequellen. Dabei stellen die Flexibilisierung von Produktionsprozessen zum Zwecke einer angebotsorientierten Energiebedarfsgestaltung sowie die Einbindung von Energiespeichern besonders wichtige Entwicklungsfelder dar (vgl. Beier et al. 2015; Ghadimi et al. 2015; Graßl 2015; Liebl et al. 2015; Schultz et al. 2015). Somit wird eine noch engere Verknüpfung der Material- und Energieflussbetrachtungen aus Sicht des Fabrikmanagements zunehmend unabdingbar. Die integrierte Betrachtung dieser Flusssysteme in der Betriebsphase, aber auch während der Gestaltung von Produktionssystemen ist eine logische Konsequenz. Mathematisch-analytische Methoden stoßen dabei infolge der komplexen Wirkzusammenhänge jedoch an ihre Grenzen, wohingegen Simulation besser geeignet ist (VDI 3633, Blatt 1, 2014).

Die unmittelbare Modellierung des Verhaltens von erneuerbaren Energiequellen und Energiespeichern war bislang in Softwarelösungen zur Materialflusssimulation nicht möglich. Folglich haben sich bisherige Untersuchungen zum Umgang mit volatilen Energieangeboten bevorzugt auf die Abbildung von Energieangeboten bzw. -preisen in Form von vordefinierten Zeitreihen beschränkt, wobei die Verbrauchsseite abhängig von der Produktion simuliert wurde (z. B. Schultz et al. 2015; Putz et al. 2016). Der Betrieb von Speichern wurde hingegen zumeist mit ebenso vordefinierten Angebots- und Lastprofilen untersucht, sodass keine Wirkzusammenhänge mit der eigentlichen Produktion betrachtet wurden (z. B. Lehmann et al. 2016). Erste Ansätze zur Integration von dezentralen Energiequellen oder -speichern wurden bisweilen nur vereinzelt vorgestellt (Ghadimi et al. 2015; Beier et al. 2016).

3 Modellierung von Energieflusssystemelementen

Ziel des im Weiteren vorgestellten Konzeptes ist es, eine durchgängige Lösung zur Modellierung von konventionellen sowie volatilen erneuerbaren, lokalen Energiequellen, Energiespeichern und Energieverbrauchern zu realisieren. Letztere Termini orientieren sich am praxisüblichen Sprachgebrauch, auch wenn es sich physikalisch korrekt um Energiewandler handelt. Die Lösung baut auf der vom Fraunhofer IWU entwickelten Klassenbibliothek eniBRIC für Siemens Plant Simulation auf (Stoldt et al. 2016) auf. Abbildung 1 zeigt die zugrundeliegenden, vereinfachten Komponentenmodelle für konventionelle Energiequellen und -verbraucher, wetterabhängige Erzeuger, inputabhängige Erzeuger und Energiespeicher.

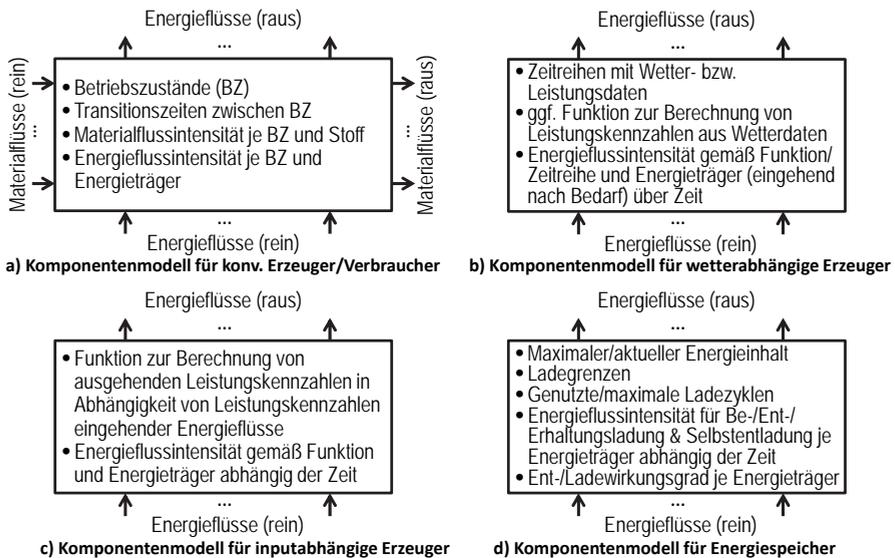


Abbildung 1: Komponentenmodelle zur Betrachtung von Energietechnologien (in Anlehnung an Stoldt et al. 2015)

Das erste Komponentenmodell (Abb. 1a) stellt die ursprünglich in eniBRIC implementierte Funktionalität nach Stoldt et al. (2016) dar, welche zunächst erläutert werden soll. Diese ist als in sich geschlossener Simulationsbaustein ausgeführt, welcher in die vom Anwender verwendeten Materialflussbausteine zu integrieren ist. Somit bildet der eniBRIC-Grundbaustein einzig die in der Vertikalen dargestellten Energieflüsse ab; Materialflussfähigkeiten sind vom zu erweiternden Baustein zu erfüllen. Die Kopplung von Material- und Energiefluss erfolgt über Schnittstellen, mit denen der eniBRIC-Grundbaustein über Materialein- und -austritte sowie Störungen informiert wird (vgl. Stoldt et al. 2016). Die Abbildung des Energieverbrauchs bzw. der Energieabgabe erfolgt unter Nutzung von betriebszustands-abhängigen Durchschnittswerten. Eine Besonderheit des eniBRIC-Grundbausteins ist, dass er die Verbindung von Erzeugern und Verbrauchern modellieren kann. Dazu kann er auch als Energiequelle (ohne Materialflussfunktionalitäten) eingesetzt werden, von der Verbraucher-Instanzen anschließend Energie beziehen.

Im Unterschied zu konventionellen Energieerzeugern in Unternehmen, wie etwa Blockheizkraftwerken, haben volatile erneuerbare Energiequellen im Allgemeinen eine wetterabhängige Leistung. Die genaue Abgabemenge kann dabei zwar mit geeigneten Modellen analytisch oder simulationsgestützt mit und ohne Zeitbezug prognostiziert werden, wird aber infolge nicht vorherzusehender Einflüsse nie exakt sein (Böen, Wolken, usw.). Für den Zweck der um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation kann jedoch auf Grundlage von Zeitreihen eine beliebig genaue Abbildung erfolgen (Abb. 1b). Dabei besteht die zentrale Anforderung, dass innerhalb der Simulation eine flexible Parametrierung gleichwohl die Modellierung mittels zuvor prognostizierter aber auch mittels in der Simulation aus Wetterdaten berechneter Abgabeleistungen ermöglicht wird. Letzteres erfordert die Spezifikation einer geeigneten Berechnungsvorschrift und etwaiger Parameter.

Inputabhängige Erzeuger (Abb. 1c) stellen eine Sonderform der voran beschriebenen Erzeuger dar, bei denen der Input nicht als Zeitreihe vorweggenommen werden kann, sondern sich aus der momentanen Einspeisung anderer Quellen, d. h. Simulationsdaten, ergibt. Beispiele dafür sind Wärmetauscher oder Energierückgewinnungsanlagen, die einen Energiestrom aufnehmen um einen anderen abgeben zu können. Hierfür bedarf es der Festlegung einer Übertragungsfunktion, mittels welcher sich eine Abgabekapazität aus einem anliegenden Eingangsstrom ermitteln lässt. Diese ist ggf. durch entsprechende Parameter zu justieren.

Energiespeicher (Abb. 1d) stellen ein Mittel zur Schaffung von Diskontinuität in der Erzeugung und im Verbrauch von Energie dar. Sie sind u. a. gekennzeichnet durch eine maximale Kapazität, Ent-/Ladewirkungsgrade, Selbstentladung und Zyklfestigkeit sowie Ladegrenzen und Ladestromrestriktionen. Dabei kann die Vereinfachung getroffen werden, dass stets ein lineares Speicherverhalten unterstellt wird. Dies trifft für eine Vielzahl von Speichern, insbesondere elektrochemische Speicher im typischen Betriebsbereich, zu und vereinfacht die Modellierung. Eine weitere Differenzierung nach Speichertechnologien erscheint im vorliegenden Zielfokus nicht zweckmäßig.

4 Erweiterung der Klassenbibliothek eniBRIC

Unter Rückgriff auf die zuvor vorgestellten Komponentenmodelle wurde die Klassenbibliothek eniBRIC erweitert. Die folgenden Ausführungen detaillieren die zusätzlich entwickelten Simulationsbausteine und deren Funktionen.

4.1 Energy Supply Manager

Die eniBRIC-Klassenbibliothek war in der Vergangenheit an eine starre 1:n-Verknüpfung von Erzeugern zu Verbrauchern je betrachtetem Energieträger gebunden (Abb. 2a). So konnten zwar beispielsweise mehrere Verbraucher von einem Stromerzeuger oder mehrere Gruppen von Verbrauchern von mehreren Erzeugern bedient werden, jedoch konnten komplexere Einspeisekonstellationen in lokale Netze nicht modelliert werden. Dies ist für die Untersuchung des Einflusses von volatilen Energiequellen und Energiespeichern jedoch unerlässlich. Daher wurde der sogenannte Energy Supply Manager (ESM) entwickelt. Dessen Aufgabe ist vergleichbar mit der eines Verteilnetzes: Leistung aufnehmen, bereitstellen und nach Bedarf abgeben.

Abbildung 2b zeigt beispielhaft ein mit dem der ESM modelliertes Versorgungssystem. Kennlich gemacht sind dabei die neu entwickelten Module. Ersichtlich wird weiterhin, dass Steuerungslogik, welche das Systemverhalten beeinflusst, nicht einzig im ESM liegt. Dies folgt dem Ansatz, dass Untersuchungen mit eniBRIC sehr flexibel und nicht auf wenige Steuerungsstrategien (z. B. Lastspitzennivellierung) beschränkt sein sollen. Folglich bietet der ESM Schnittstellen, mittels welcher der Nutzer Ent-/Ladeanforderungen für die Speicher initiieren kann. Die interne Logik des ESM setzt diese unter Beachtung des Ladezustands und der Verfügbarkeit von Energie um. Zugleich verteilt er Bedarfe auf andere Erzeuger um, sobald einer sein Leistungsangebot verändert (z. B. infolge von Volatilität). Dies folgt einer zuvor definierten Priorisierung und unter der Annahme, dass etwaiger Mangelbedarf stets durch einen Erzeuger gedeckt ist. Dies ist im Produktionskontext zu erwarten.

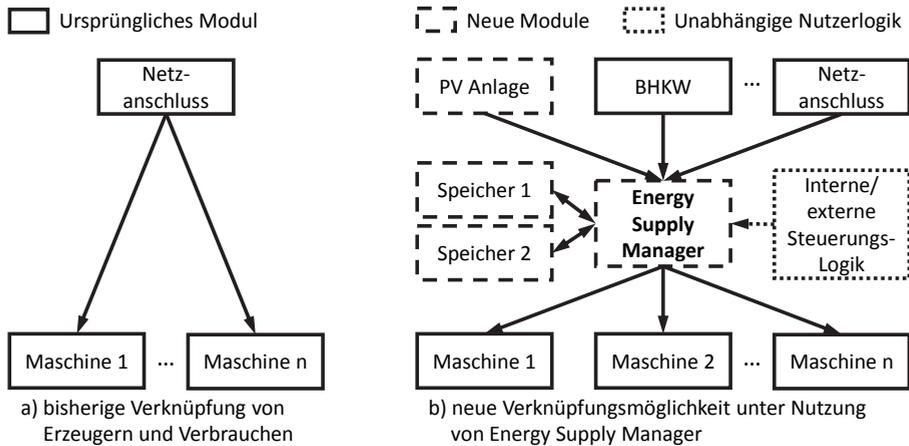


Abbildung 2: Vergleich bisheriger und erweiterter Implementation von eniBRIC

Der ESM stellt für jede Änderung der Leistung eines Elements und somit zu jedem Zeitpunkt sicher, dass die abgegebene Leistung ihm durch einspeisende Elemente bereitgestellt wird. Der ESM bestätigt, entsprechend dieser getroffenen Annahme, zunächst allen anfragenden Verbrauchern die Versorgung. In einem zweiten Schritt, jedoch zum gleichen Zeitpunkt, fordert er die zugesagte Leistung von den mit ihm verbundenen leistungsbereitstellenden Elementen ein. Hierfür wird zuvor ermittelt, welchen Beitrag die angeschlossenen Speicher nach ihren Lade- bzw. Entladestrategien beisteuern sollen bzw. können (vgl. Abschnitt 4.3). Anzumerken ist, dass diese sowohl als Quelle als auch als Verbraucher wirken können, je nachdem, ob Speicher geladen oder entladen werden.

Ist der Leistungsbedarf nach der Berücksichtigung der Speicher ermittelt, gilt es die Erzeuger einzubeziehen. Hierfür wird für jeden Erzeuger, entsprechend der Prioritätenreihenfolge, ermittelt welche Leistung dieser dem ESM bereitstellen kann, die noch zu verteilende Leistung entsprechend verringert und der Erzeuger belastet. Im Normalfall sollte ein Netzanschluss (als typischer „Erzeuger“, der stets zur Garantie störungsfreier Versorgung in Produktionsunternehmen verfügbar ist) somit zuletzt abgefragt werden und den dann noch übrigen Leistungsbedarf vollständig decken. Der Energiefluss erfolgt somit wie in Abbildung 3 illustriert. Von den Erzeugern auf der linken Seite zu den Verbrauchern auf der rechten, während Speicher sowohl Energie aufnehmen als auch abgeben können.

Die zuvor beschriebene Bilanzierung, um abgegebene und aufgenommene Leistung auszugleichen, wird durch eine Maklermethode realisiert. Gegenüber Erzeugern und Verbrauchern imitiert der ESM, wie in Abbildung 3 angedeutet, gewöhnliche Verbraucher bzw. Erzeuger. Dazu werden bereits zuvor existierende Schnittstellen genutzt. Dies wird durch die Integration von Pseudo-Instanzen des eniBRIC-Grundbausteins (ein Erzeuger, beliebig viele Verbraucher) erreicht. Diese implementieren die ursprüngliche Schnittstelle zur Verbraucher-Erzeuger-Kommunikation, untersetzen diese jedoch mit neuer Funktionalität. Zur Kommunikation zwischen Speicher und ESM wurden zudem neue Schnittstellen implementiert, um die Be-/Entladung von Speichern durch den ESM zu veranlassen, ihm das Erreichen von Ladegrenzen anzuzeigen und eine externe Speichersteuerung anzubinden.

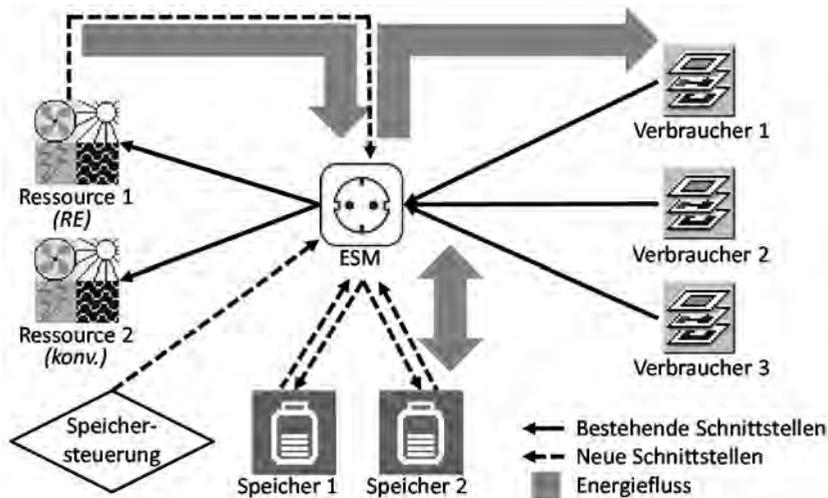


Abbildung 3: Energieflussschema durch den ESM

4.2 Volatile erneuerbare Energieerzeuger

Die Herausforderung bei der Modellierung erneuerbarer Energieerzeugung liegt in ihrem volatilen Charakter begründet. Wie in Abschnitt 3 erläutert, kann die veränderliche Abgabeleistung eines solchen Erzeugers über eine Funktion und eine Zeitreihe von Eingangswerten abgebildet bzw. ggf. auch erst während der Laufzeit errechnet werden. Entsprechend waren in der Implementierung zwei zentrale Probleme zu lösen: die möglichst flexible Parametrierung des Zusammenhangs aus Zeitreihe(n) und möglicher Abgabeleistung sowie die Abbildung des veränderlichen Profils unter Nutzung der existierenden Schnittstellen von eniBRIC.

Der Ausgangspunkt zur Bewältigung des erstgenannten Problems liegt in der Annahme, dass die Abgabeleistung als stückweise Funktion von t dargestellt werden kann. Im Trivialfall kann dies gleichbedeutend mit der Zeitreihe eines aufgezeichneten Leistungsverlaufs einer realen Anlage sein. Andere beliebig komplexe analytische Formeln, welche auch von mehreren Zeitreihen und weiteren konstanten Parametern abhängen dürfen, sind ebenso denkbar, unter der Bedingung, dass alle Werte zu allen Zeitpunkten der Reihe definiert werden können. Um unter Beachtung dieser Bedingungen eine flexible Parametrierung zu ermöglichen, wurde ein Parser entwickelt, der eine als Zeichenkette definierte Formel in ausführbaren Code überführt. Entsprechende statisch oder in Zeitreihen vorliegende Parameter sind dafür zunächst in vordefinierten Tabellenstrukturen festzulegen. Der Code kann dann zu Beginn der Simulation oder im Verlauf ebendieser zur Bestimmung der rechnerisch bestimmten Abgabeleistung genutzt werden.

Wie sich die Abbildung zeitlich flexibler Verbrauchsprofile realisieren lässt, wurde bereits in Stoldt et al. (2016) und Stoldt et al. (2017) gezeigt. Zugleich ermöglicht es die Objektorientierung in Siemens Plant Simulation, Funktionalität anderer Elemente durch Vererbung für neue zu übernehmen. So lassen sich beispielsweise weitere Funktionen ergänzen oder spezifische Änderungen vornehmen. Diesem Paradigma der Programmierung wurde gefolgt und auf die von Stoldt et al. (2016) vorgestellten Erzeuger aufgebaut. Diese beinhalten bereits die Funktionalität in unterschiedliche

produktive Betriebszustände mit verschiedenen maximalen Leistungsabgabewerten zu operieren und zwischen diesen geschaltet zu werden.

Für die Implementierung erneuerbarer Energiequellen wurde eine Kind-Klasse von der ursprünglichen Erzeuger-Klasse, welche allein aus einem eniBRIC-Grundbaustein besteht, abgeleitet. Diese wurde ergänzt um die erläuterten Funktionalitäten zur Parametrierung und Berechnung der maximalen Abgabeleistung sowie zur Anpassung ebendieser während der Laufzeit. Letzteres wird durch die Einführung von zwei Betriebszuständen für den Normalbetrieb realisiert, deren Parametrierung dynamisch angepasst wird, bevor zwischen diesen hin und her geschaltet wird. Auf diese Weise kann die ursprüngliche Zustandswechsellogik von eniBRIC beibehalten werden. Lediglich die Ergänzung einer Schnittstelle zur Meldung eines veränderten Angebots an den ESM (Abb. 3, links oben) war notwendig.

Während der Simulation sind Ereignisse zu erzeugen, welche die Funktion zur Anpassung der maximalen Abgabeleistung aufrufen, sobald dies entsprechend der Zeitreihen notwendig ist. Dies wird mit Hilfe der in Siemens Plant Simulation bereitgestellten Klasse „Trigger“ realisiert. Diese ermöglicht es, zu definierten Zeitpunkten Ereignisse und somit Schaltvorgänge im Erzeuger auszulösen.

Im Unterschied zu den wetterabhängigen Erzeugern kann für inputabhängige Erzeuger (Abb. 1b und 1c) der Verlauf der maximalen Abgabeleistung nicht auf Grundlage einer Zeitreihe vorweggenommen werden. Vielmehr muss stets eine Neuberechnung durchgeführt werden, wenn sich die aufgenommene Leistung verändert. Die Grundlagen dazu existieren bereits in der Klasse für erneuerbare Energieerzeuger, speziell die Parametrierung und Berechnung der Abgabeleistung sowie die Funktionalität zur dynamischen Leistungsabgabe mittels zweier Betriebszustände. Da die Logik von eniBRIC bisweilen jedoch davon ausgeht, dass die tatsächliche Abgabe eines Erzeugers (bis zur maximal möglichen) dem Bedarf der jeweiligen Verbraucher folgt, sind noch zusätzliche Erweiterungen notwendig. Mit diesen wäre dann ein Verbrauch abzubilden, welcher dem Angebot folgt, wobei die Änderung des Inputs zugleich in eine Anpassung der Angebotsleistung zu übersetzen ist. Dies wird Bestandteil zukünftiger Entwicklungen.

4.3 Energiespeicher

In Abbildung 1d ist die von Stoldt et al. (2015) vorgeschlagene Energiespeicherkomponente inklusive ihrer Charakteristika dargestellt. Im Zuge der Implementierung sind diese zunächst auf Folgende reduziert worden: Der maximale Energieinhalt (auch „Kapazität“), die obere und untere Ladegrenzen unterhalb dieses sowie die maximale Lade- bzw. Entladeleistung wurden für eine erste Umsetzung als kritisch angesehen. Hinzu kommen Wirkungsgrade für das Speichern – im Sinne des Einlagerns – sowie für das Bereitstellen (Auslagern) der Energie. Erhaltungsladung und Selbstentladung werden derzeit nicht berücksichtigt. Diese vorgestellten charakteristischen Werte wurden als Variablen in der entwickelten Speicher-Klasse ausgeführt. Sie dienen dem Nutzer zur Parametrierung, sodass sich konkrete Speicher für den jeweiligen Anwendungsfall modellieren lassen.

Das implementierte Speichermodell nutzt die in Siemens Plant Simulation verfügbaren Fluidelemente. Während der Initialisierung der Simulation wird in jeder Instanz der Speicher-Klasse eine Instanz der Standard-Klasse Tank angelegt, dessen Aufnahmevolumen dem charakteristischen Wert der Speicherkapazität entspricht.

Über die Stromintensität der Zuleitung und Ableitung wird die jeweils bezogene oder abgegebene Leistung modelliert und jeweils entsprechend bei Änderungen aktualisiert. Da Speicher – zumindest in ihrer simulationsseitigen Abbildung – entweder laden oder entladen (im Grenzfall mit Leistung 0) ist der Tank auch zu jedem Zeitpunkt entweder mit der Zuleitung *oder* mit der Ableitung verbunden. Die Tank-Klasse birgt die Möglichkeit Methoden aufzurufen, sobald definierbare Ladeschwellen erreicht werden. Dies wird genutzt, um ein Stoppen des Ladens für die obere bzw. zum Stoppen des Entladens für die untere Ladegrenze zu erwirken.

Die Speicher-Klasse verfügt, wie in Abbildung 3 gezeigt über Schnittstellen zum Informationsaustausch mit dem ESM. Konkret handelt es sich um eine Schnittstelle zur Festlegung des Ladezustands des Speichers (vom ESM zum Speicher) und eine zur Rückmeldung eines veränderten Ladestatus (vom Speicher zum ESM). Der ESM verfügt wiederum über eine Schnittstelle mittels derer festgelegt wird, mit welcher Leistung einzelne oder alle Speicher laden bzw. entladen werden sollten.

Erstgenannte Schnittstelle wird vom ESM angesteuert, um eine Instanz der Speicher-Klasse während der Laufzeit und unter Angabe der gewünschten Ent-/Ladeleistung in einen ladenden oder entladenden Zustand zu versetzen bzw. den Ladestrom zu verändern. Dabei erfolgt eine Plausibilisierung der Leistungsangabe in der Logik der Speicher-Klasse, sodass die charakteristischen Leistungsgrenzen sowie Ladegrenzen nicht verletzt werden. Eine Leistungsminderung, etwa infolge eines zu geringen Bedarfs der Verbraucher, unterhalb dieser ist zulässig.

Nach jeder Verwendung o. g. Schnittstelle oder bei Erreichen von Ladegrenzen melden Speicher-Instanzen dem ESM, welcher Leistungsbeitrag tatsächlich geliefert wird. Auf diese Weise werden nicht realisierbare Anforderungen (z. B. oberhalb der Leistungsgrenze bzw. außerhalb der Ladegrenzen) direkt beantwortet, sodass die ESM-Maklerfunktion in ihren Berechnungen zur Leistungsverteilung konsistent bleibt. Zugleich wird dem ESM damit das Ende von Ent-/Ladevorgängen angezeigt.

Soll-Ladezustände werden dem ESM unter Angabe der betroffenen Speicher und der vorzeichenbehafteten Ladeleistung (negativ = Entladung und vice versa) übermittelt. Die ESM-Maklerfunktion versucht dies prioritär, d. h. noch vor Einbezug der Erzeuger, umzusetzen. Ist der Bedarf aller relevanten Verbraucher unterhalb der Soll-Abgabeladeleistung, so reduziert der ESM automatisch die Anforderung. Für die Verteilung der Speicher untereinander wird ein Prioritätsansatz genutzt, sodass die Soll-Leistung des Speichers mit der höchsten Priorität zunächst ausgeschöpft wird, bevor ein zweiter entladen wird.

Wann welcher Speicher geladen und entladen werden soll, ist die Frage, die in diesem Beitrag mit der Betriebsstrategie gleichgesetzt wird. Verschiedenste Zielstellungen kommen hierfür in Frage: Neben der bereits genannten Lastspitzennivellierung kommen die Maximierung des Eigenverbrauchs oder gar Kostenaspekte für dynamisch monetär bewertete Energiebereitstellung in Frage. Mit der vorgestellten Implementierung wurde die Basis geschaffen, unterschiedliche Algorithmen für unterschiedliche Zielstellungen zu erproben. Die Entwicklung parametrierbarer Logikbausteine zur Realisierung üblicher Strategien ist ein zukünftiges Entwicklungsziel.

5 Funktionale Überprüfung

Da dieser Beitrag eine Erweiterung eines Simulationswerkzeugs beschreibt, konnte kein Nachweis zur realitätstreuen Abbildung des Verhaltens eines spezifischen Systems geführt werden. Stattdessen wurde die Korrektheit implementierter Funktionalität mithilfe eines Minimalbeispiels untersucht. Rabe et al. (2008) folgend wurde die Überprüfung der neuen Elemente stets begleitend zur Implementierung vorgenommen und – sobald möglich – in das erwähnte Beispielmodell übernommen.

Diese Testumgebung umfasst zwei Verbraucher, zwei Speicher und drei Quellen, eine davon als erneuerbarer Erzeuger ausgeführt. Letztgenannte hatte die höchste Priorität, vor einer konventionellen Quelle mit geringer Leistung. Da diese vereint nicht den maximalen Bedarf der Verbraucher abzudecken vermögen, wurde der dritte, ebenfalls konventionelle Erzeuger zum Ausgleich notwendig. Dieser ist mit ausreichend hoher maximaler Leistungsabgabe versehen, was der Annahme folgt, dass stets eine Quelle mit genügend Leistung bereitsteht, den Bedarf zu sättigen.

Die genannten Elemente wurden über den ESM miteinander verknüpft. Die Funktionsweise des ESM wurde geprüft, indem Erzeuger und Verbraucher im Versuchslauf in verschiedenen Betriebszustandskombinationen betrieben wurden und die Summenbilanz anschließend ausgewertet wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass zu jedem Zeitpunkt die Leistungssumme der Verbraucher durch die Erzeuger bereitgestellt wurde. Speicher fungierten in diesen Experimenten erwartungsgemäß als Energiequellen oder -senken.

Mit den Betriebszustandskombinationen wurden alle Kommunikationsrichtungen erfasst, sodass gleichwohl Änderungen auf der Verbraucher- und der Erzeugerseite, aber auch bei den Speichern durch die ESM-Maklerfunktion zu verarbeiten waren. Teilfunktionalitäten, wie etwa die Beendigung von Ladegrenzen bei Erreichung einer Ladegrenze des Speichers, wurden mit diesem Vorgehen implizit überprüft. Während der Programmierung sind diese jedoch bereits entwicklungsbegleitend intensiv überprüft worden. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass Speicher, erneuerbare Quellen, sowie ihr Zusammenspiel mit Hilfe des ESMs wie erwartet und beschrieben wirken. Die Implementation wird somit als verifiziert betrachtet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Erweiterung der Klassenbibliothek eniBRIC für Siemens Plant Simulation vorgestellt. Während eniBRIC bereits den Einbezug von Energiebetrachtung ermöglichte, können mit der Erweiterung zudem erneuerbare Energiequellen und Energiespeicher simuliert werden. Generischen Ansätzen folgend, lassen sich die Elemente anhand charakteristischer Größen parametrieren. Um bestehende Logik weiterverwenden und zugleich die komplexeren Zusammenhänge infolge der Einbindung dieser neuen Elemente bewältigen zu können, wurde mit dem ESM ein Element zur Modellierung des Verteilnetzes geschaffen. Die Implementation in sich wurde erfolgreich verifiziert und ist kompatibel mit Modellen, die ältere Versionen der Klassenbibliothek nutzen.

Zukünftige Arbeiten sollen drei Schwerpunkten folgen: Zunächst können auf Grundlage der wetterabhängigen Erzeuger auch inputabhängige Erzeuger entwickelt werden. Auch die Entwicklung von Bibliotheken von Logikbausteinen zur

Speichersteuerung sowie von vorparametrierten Speicher- und Erzeuger-Klassen erscheint lohnenswert.

Literatur

- Beier, J.; Neef, B.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 483–488.
- Beier, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation. *Procedia CIRP* 37 (2015), S. 18–23.
- Europäische Kommission: Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. In: *Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030*. http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_de.htm. Letzter Zugriff am 10.10.2016.
- Ghadimi, P.; Kara, S.; Kornfeld, B.: Renewable energy integration into factories: Real-time control of on-site energy systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015) 1, S. 443–446.
- Graßl, M.: *Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion*. München: Utz 2015.
- Lehmann, C.; Weeber, M.; Böhner, J.; Steinhilper, R.: Techno-economical Analysis of Photovoltaic-battery Storage Systems for Peak-shaving Applications and Self-consumption Optimization in Existing Production Plants. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 313–318.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M.F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen–Energieflexibilitäts-Kennfelder zur Abschätzung der Energieflexibilitäts-Potentiale unterschiedlicher Anlagen. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 3, S. 136–140.
- Putz, M.; Götz, U.; Stoldt, J.; Franz, E.: Target systems and Decision-Making to Increase Production Sustainability. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 34–39.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Schultz, C.; Sellmaier, P.; Reinhart, G.: An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 197–202.
- Statista: Ziele des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im Stromsektor in Deutschland bis 2050. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/217056/umfrage/ziele-des-erneuerbare-energien-gesetzes/>. Letzter Zugriff am 20.01.2016.
- Stoldt, J.; Cherkaskyy, M.; Franz, E.; Putz, M.; Oertwig, N.; Uhlmann, E.: Modellierung von Energietechnologien zum nachhaltigen Reengineering von Produktionsunternehmen. In: Müller, E. (Hrsg.): *Planung und Betrieb von Produktionssystemen im digitalen Zeitalter: VPP2015 - Vernetzt planen und produzieren: Tagungsband*, Chemnitz, 23. Oktober 2015. Chemnitz: Inst. für Betriebswiss. und Fabrikssysteme 2015, S. 81–90.
- Stoldt, J.; Fanghänel, C.; Lange, H.R.; Schlegel, A.; Woldt, T.; Putz, M.: Simulation Study on Flexibilities in the Material and Energy Flows of an Open-pit Mine. Erscheint in: *Simulation Notes Europe* 27 (2017) 4.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Putz, M.: Enhanced integration of energy-related considerations in discrete event simulation for manufacturing applications. *Journal of Simulation* 10 (2016) 2, S. 113–122.
- VDI 3633, Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen*. Berlin: Beuth 2014.

OptPlanEnergie – Der Einsatz von Simulation und Optimierung zur Verringerung des Energiebedarfs bei der Produktion von Sicherheitsglas

OptPlanEnergie – Using Simulation and Optimization to Enhance the Energy-efficient Production of Tempered Glass

Frank Baumann, Heike Wilson, DUALIS GmbH IT Solution, Dresden (Germany),
fbaumann@dualis-it.de, hwilson@dualis-it.de

Stephan Seidel, Matthias Franke, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen,
Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme, Dresden (Germany),
stephan.seidel@eas.iis.fraunhofer.de, matthias.franke@eas.iis.fraunhofer.de

Ulrike Gromnitza, Bischoff Glastechnik GmbH, Bretten (Germany),
ulrike.gromnitza@bgt-bretten.de

Abstract: In many industrial manufacturing processes energy use is one of the most important cost factors. Especially in energy-intensive industries like steel production or glass processing minimising energy use is a key measure to save resources and reduce manufacturing costs. The project OptPlanEnergie concentrates on the production of tempered glass. In this project we apply simulation and optimization techniques to identify and reduce energetic losses that occur during the fabrication process. The aim of the project is to supply a toolchain for creating high-performance simulation models of crucial production steps and integrating these models in scheduling frameworks to facilitate the optimization of loading sequences and capacity allocation to reduce energy consumption. In OptPlanEnergie we prototypically study the production of tempered glass, but our approach allows a simple adaptation to a wide range of industries.

1 Einführung

Bei vielen industriellen Prozessen zur Herstellung von Produkten und Waren ist der Energieeinsatz einer der größten Kostenfaktoren. Die Minimierung des Energieeinsatzes ist dabei speziell bei energieintensiven Herstellungsprozessen in der Glas- und Stahlindustrie ein Mittel, um einerseits Ressourcen zu schonen und andererseits Kosten zu sparen.

Im Rahmen des Projektes OptPlanEnergie soll der Energieeinsatz zur Produktion von Sicherheitsglas durch den Einsatz von Simulation und Optimierung gesenkt werden.

Dabei ist es das Projektziel, eine Toolchain zu erstellen, welche es ermöglicht, performante Simulationsmodelle des beteiligten Prozesses zu erzeugen und diese zur Optimierung der Produktionsreihenfolge und Auslastung der entsprechenden Arbeitsstationen einzusetzen. In OptPlanEnergie wird dazu prototypisch die Herstellung von Sicherheitsglas untersucht. Gleichzeitig ist der im Projekt entwickelte Ansatz jedoch so universell, dass jede Art von Produktionsprozess bzw. Stückgutprozess abgebildet werden kann.

Der vorliegende Beitrag stellt die Fortsetzung des auf der ASIM 2016 (Baumann et al. 2016) vorgestellten Projektansatzes dar, vertieft die darin angeführten Ansätze und erläutert die seitdem im Projekt erreichten Ziele. Es werden deshalb die bereits im o. g. Beitrag erläuterten Vorgehensweisen nur kurz rekapituliert. Dieser Beitrag gliedert sich entsprechend der drei Hauptsäulen des Projektes in die Abschnitte Datenanalyse, Modellbildung und Optimierung.

2 Datenanalyse

In diesem Abschnitt wird zunächst der technische Ablauf des untersuchten Temper-Prozesses beschrieben und im Anschluss die Erfassung und Aufbereitung der Energiemessdaten erläutert.

2.1 Temper-Prozess

Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) wird aus normalem Floatglas erzeugt, indem das Floatglas in einem Temperofen wärmetechnisch behandelt wird. Dabei wird es bis zur Transitionstemperatur erhitzt, bei der das Glas zu fließen beginnt, und anschließend sehr schnell in einer Gebläsekammer abgekühlt. Die dabei eintretende Aushärtung des Glases erzeugt innere Spannungen, welche beim Bruch des Glases zu einem charakteristischen Bruchbild mit sehr geringen Scherbengrößen führen. ESG wird neben vielen anderen Einsatzgebieten auch in der Baubranche zur Verkleidung von Fassaden verwendet.

Verbund-Sicherheitsglas (VSG) wird aus mehreren Lagen ESG hergestellt, indem die einzelnen Scheiben miteinander verklebt werden. Im Zentrum der Untersuchung stehen der Temperprozess und der verwendete Ofen sowie der nachgelagerte Abkühlprozess. Dieser wird ausschließlich mit Elektroenergie versorgt, d. h. die Heizung erfolgt über 27 elektrische Heizwendeln und die Kühlung über drei große Kühlgebläse, welche Außenluft in einem abgeschlossenen Raum um das Glas zirkulieren. Die Wärme der Abluft wird nicht zurückgewonnen. Ca. 80 % der Gesamtenergie werden für die Heizung, die restlichen 20 % für die Kühlung aufgewendet. Der Verbrauch weiterer Elektroenergieverbraucher ist im Vergleich dazu gering und wird nicht betrachtet.

2.2 Datenquellen

Als Herausforderung sind im Projekt die Modellbildung und die zugrundeliegende Datenanalyse zu sehen, da die Daten von Produktion und Energiebezug sowohl zeitlich und datentechnisch getrennt erfasst werden. In Abbildung 1 ist die Toolchain zur Datenanalyse dargestellt. Die Energiedaten werden minutlich von einem Energiemonitoringsystem erfasst und gespeichert und umfassen den Elektroenergieverbrauch von Heizung (max. 3 MW Leistungsaufnahme) und Kühlgebläse (max.

800 kW Leistungsaufnahme), da diese die größten Verbraucher im Ofenprozess sind. Ein Export der Energiedaten ist als Excel-Datei möglich.

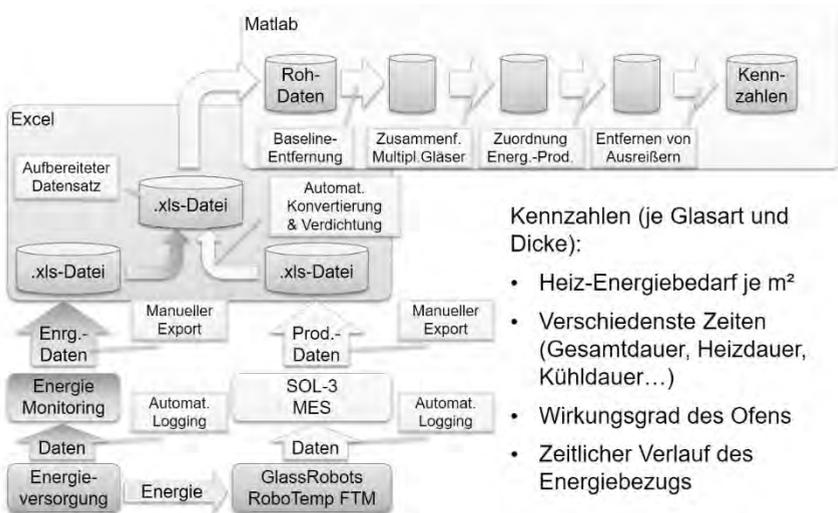


Abbildung 1: Toolchain für die Datenanalyse

Die Produktionsdaten jeder Glasscheibe werden über das von dem Glashersteller eingesetzte Enterprise Resource Planning System (ERP) SOL-3 erfasst und ebenfalls zentral gespeichert. Diese Daten umfassen u. a.:

- Glasart
- Dimension (Länge/Breite/Höhe)
- Auftrags- und Positionsnummern
- Fläche
- Meldezeitpunkte vor und nach dem Ofen

Ziel ist es dabei, die Auswertung, Bereinigung und Kombination beider Datenquellen so zu automatisieren, dass ohne manuelles Sichten und Sortieren aus der großen Datenmenge, welche durch minütliches Logging der Energiedaten und der produktgenauen Erfassung der Produktionsdaten anfällt, die für das Simulationsmodell relevanten Parameter extrahiert werden. Dabei stellt sich der menschliche Eingriff in den Produktionsprozess als besonders problematisch dar, da er zu nicht vorhersagbaren zeitlichen Schwankungen führt, welche bei der Datenanalyse erkannt und bereinigt werden müssen.

Beispielsweise erfolgt das Erfassen der Meldezeitpunkte rein manuell, indem vom verantwortlichen Ofenbediener der Barcode der Scheiben vom Begleitbogen eingescannt wird. Dabei ist der Zeitverzug zwischen Scannen und Start der Bearbeitung großen Schwankungen unterlegen und kann zwischen 30 Sekunden bis zu 20 Minuten betragen. Dieser Zeitverzug ist bedingt durch das Bearbeitungsregime am Ofen und die Handlungsabfolgen der einzelnen Mitarbeiter. Ziel der automatisierten Datenanalyse ist es, folgende Kennzahlen zu ermitteln:

- Energiebedarf zum Tempern für verschiedene Glastypen, Heiz- und Kühlzeiten, Prozesstemperaturen
- Standby-Energieverbrauch
- Energiebedarf bei Aufheizen
- Abkühlkurve, Zeitkonstanten beim Auskühlen

Diese Daten werden dazu genutzt, den Ofenprozess zu analysieren und charakteristische Kennzahlen (energetischer Grundbedarf des Ofens, Energiebedarf in Abhängigkeit der Glasparameter, Zeitkonstanten und typische Temperaturen, etc.) zu ermitteln und zu quantifizieren. Dazu werden diese Daten durch ein umfangreiches VisualBasic-Skript mit den entsprechenden Energiedaten des gleichen Zeitraums kombiniert und gleichzeitig monatliche, quartalsweise und jährliche Daten kombiniert. Die resultierenden Excel-Dateien bilden die Grundlage zur weiteren Verarbeitung in MATLAB.

In MATLAB werden zunächst Produktions- und Energiedaten getrennt vorverarbeitet und der Energieverbrauch um den Grundverbrauch des Ofens zum Ausgleich der Wärmeverluste bereinigt. Anschließend werden die markanten Energiespitzen, welche beim Aufheizen und Abkühlen des Glases auftreten, identifiziert. In den Produktionsdaten werden zunächst die Gläser sortiert und ggf. zusammengefasst. Da die Daten keine Information darüber enthalten, wie viele Glasscheiben gleichzeitig im Ofen prozessiert werden und oftmals mehrere Scheiben gleiche Zeitstempel aufweisen, wird diese Zahl anhand der Glasfläche ermittelt und Gläser entsprechend zu einzelnen Batches zusammengefasst. Die Zeitstempel der Energie-Peaks können anschließend den Zeitstempeln der Ofenbatches zugeordnet werden. Ungültige Daten (Energie- oder andere Parameter sowie Zeiten außerhalb von Grenzwerten) werden erkannt und verworfen. Sowohl die zeitliche Streuung als auch die fehlenden Daten zu den Batchgrößen werden vom MATLAB-Skript durch einen umfassenden Plausibilitätscheck kompensiert und aussortiert. Damit soll eine genaue Zuordnung der Produktionsdaten (Heizbetrieb des Ofens beim Tempern der Scheiben) und der korrespondierenden Energiedaten ermöglicht werden.

Zusätzlich wird eine sogenannte Standby-Untersuchung durchgeführt, bei welcher der Standby-Energieverbrauch des Ofens bestimmt wird. Diese Werte sind für das Modell von Bedeutung, um auch den Energiebedarf bei Aufheizen des Ofens auf Betriebstemperatur und im Standby-Betrieb richtig abzubilden und eine Optimierung des Ofenbetriebs zu ermöglichen.

Als Resultat der Datenanalyse stehen für das Simulationsmodell der Arbeitsstation die für jeden Produkttyp notwendigen Prozessparameter zur Verfügung. Für den im Projekt untersuchten Beispielprozess sind dies die folgenden Parameter:

- Rezeptparameter (Temperaturen und Zeiten) für den jeweiligen Glastyp und die Dimension
- Energieeinsatz für Aufheizung und Abkühlung des Glases
- Energiebedarfe und Zeiten zur Vorbereitung des Ofens sowie im Standby

Diese Parameter werden in Tabellen bzw. den zugehörigen Dateien abgelegt und können vom Simulationsmodell später direkt gelesen werden.

3 Modellbildung

Das Simulationsmodell liefert die Daten, mit denen sich der Energie- und Zeitbedarf für die Produktion einer Abfolge von Fertigungsaufträgen simulieren und folglich optimieren lässt. Im Einzelnen sind diese Daten die Produktparameter, wie eingesetzte Energien sowie relevante Zeiten und Anlagenzustände.

Da das Modell in einer Optimierungsumgebung eingesetzt werden soll, ist eine hohe Performance unabdingbar. Gleichzeitig sollte sichergestellt werden, dass das Prozessmodell mit etablierten Tools entwickelt werden kann und eine standardisierte Schnittstelle aufweist, über die es vom Optimierungsmodul aufgerufen wird. Um dies zu ermöglichen wird auf die Simulationssprache Modelica zurückgegriffen und das Modell mit dieser Sprache mit dem Simulationstool SimulationX (SimulationX, 2016) entwickelt.

3.1 Struktur des Ofenmodells

Das Ofenmodell im Speziellen beziehungsweise das Prozessmodell im Allgemeinen können je nach Informationslage mit verschiedenen Paradigmen entwickelt werden. In einem WhiteBox-Ansatz werden detaillierte physikalische Gleichungen aufgestellt, welche das Verhalten des Prozesses sehr genau wiedergeben. Diese Modellierungsweise bietet den Vorteil, dass das Modell für alle Bedingungen gilt. Es ist jedoch zum einen aufwendig in der Erstellung und zum anderen auch sehr rechenzeitintensiv.

Ein weiterer Ansatz ist die GreyBox-Methode, bei der grundlegende physikalische Zusammenhänge in Gleichungsform beschrieben werden, jedoch die Parametrierung über ein Anlernen mit Messdaten erfolgt, sodass die resultierenden Parameter keiner real vorhandenen Eigenschaft des Systems entsprechen müssen. Der Abstraktionsgrad des Modells ist größer, die Genauigkeit geringer und die Gültigkeit des Modells auf den Bereich, aus dem Messdaten vorliegen, beschränkt.

Als dritter Ansatz, welcher auch im Projekt verfolgt wird, ist der BlackBox-Ansatz zu nennen. Dabei werden Messdaten direkt zum Training des Modells bzw. im Modell selbst verwendet, sodass einerseits die Information über die physikalische Funktion des Prozesses nicht bekannt sein muss, andererseits jedoch die Messdaten alle benötigten Bedingungen umfassen müssen. Nicht durch Daten abgedeckte Betriebszustände führen dabei zu falschen Ergebnissen.

Das entwickelte Ofenmodell verfügt über keine Eingänge, jedoch über verschiedene Parameter und Ausgänge. Parameter sind dabei Glastyp, Dimension und Anzahl sowie der Ofenzustand. Ausgangsvariablen sind Zeiten (Prozesszeit, Gesamtzeit, Wartezeit), Energiedaten (Aufheizen, Prozessieren, Abkühlen, Warten) sowie die Ofentemperatur bei Prozessende.

Der Aufbau des Modells besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: zum einen einer Blockstruktur (vgl. Abb. 2), über welche die jeweiligen Prozessdaten aus den hinterlegten Tabellen gewonnen und verarbeitet werden, und zum anderen aus einem Zustandsdiagramm (vgl. Abb. 3), mit dem die verschiedenen Betriebszustände des Ofens modelliert sind. Diese umfassen neun Zustände (Initial, Standby, Vorbereitung Heizung, Vorbereitung Kühlen, Bereit, Prozessheizen, Prozesskühlen, Beendet, Gestoppt), welche während der Simulation in Abhängigkeit von zeit- und temperaturgesteuerten Transitionen durchlaufen werden. Je nach Betriebszustand

werden dann die entsprechenden Heiz- und Kühlleistungen und Temperaturen in der Blockstruktur parametrisiert und verarbeitet. Das Zustandsdiagramm wird grafisch erstellt und durch eine automatische Codegenerierung in Modelica-Code umgewandelt (Seidel und Donath 2011).

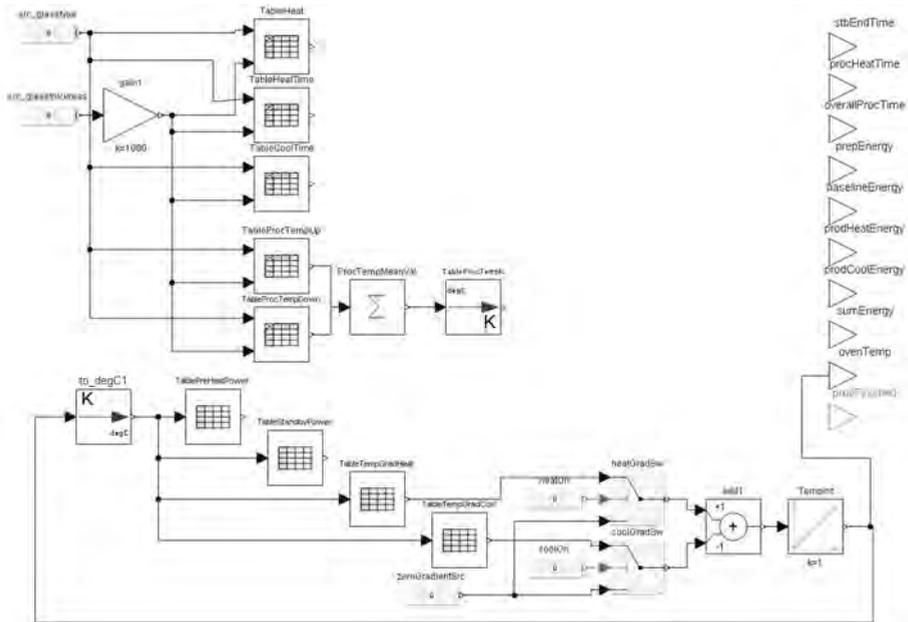


Abbildung 2: Blockstruktur des Ofenmodells (Screenshot aus SimulationX)

Das Modell wird durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Werten validiert. Da das Modell als BlackBox-Modell jedoch auf den Messdaten basiert, ist diese Validierung als Funktionstest zu sehen. Gleichzeitig wird die Performance des Modells evaluiert, da es beim Einsatz in der Optimierungstoolchain sehr schnell ausgeführt werden muss.

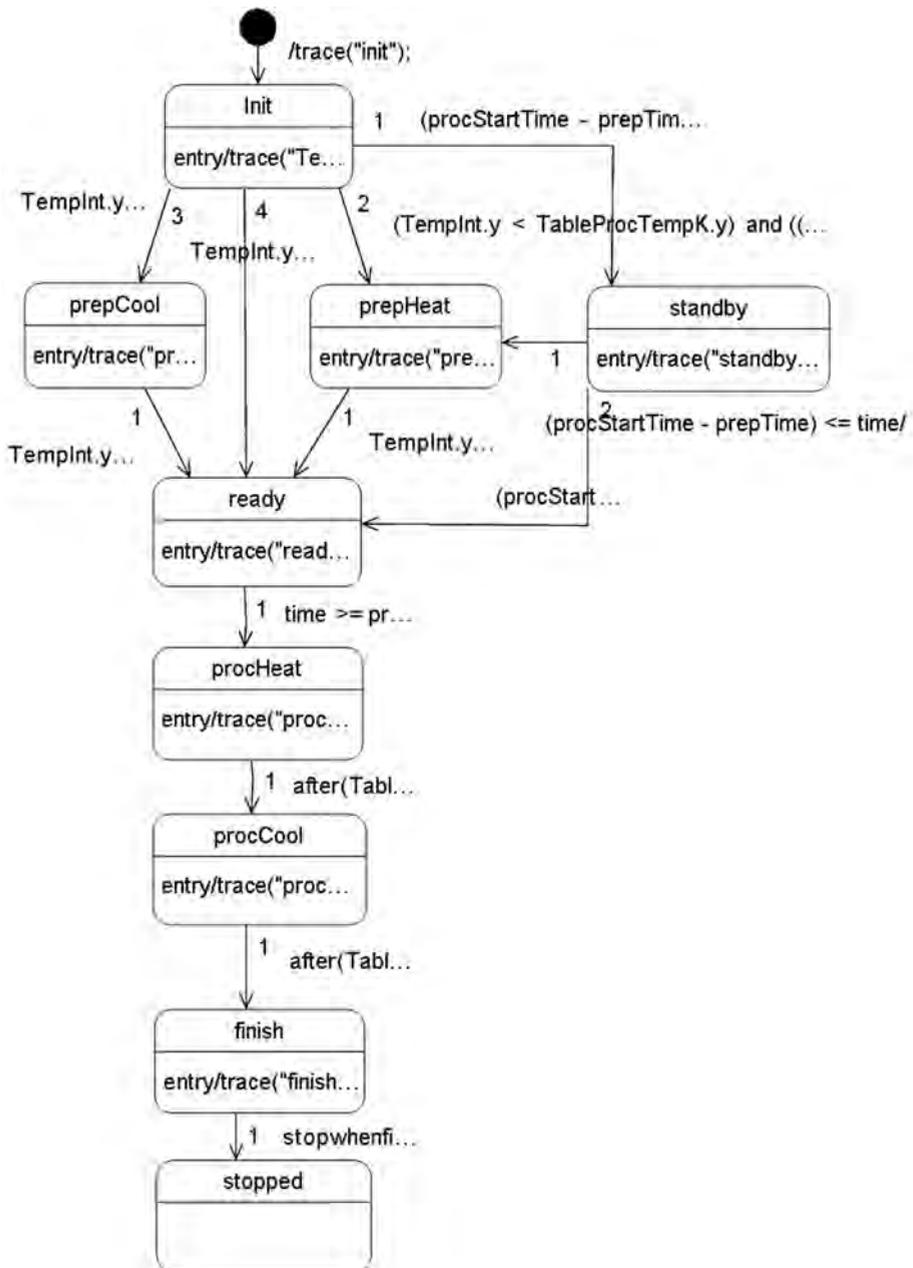


Abbildung 3: Zustandsdiagramm des Ofenmodells

3.2 Export des Modells als Functional Mockup Unit

Als nächster wichtiger Schritt nach der Modellerstellung ist der Modellexport als Functional Mockup Unit (FMU) (Blochwitz et al. 2012) zu sehen. Viele Modelica-Simulationswerkzeuge ermöglichen es, Modelle in einem einheitlichen Format als

FMU zu exportieren und auch zu importieren. Über das Functional Mockup Interface (FMI) (Functional Mock-up Interface 2014), welches ebenfalls standardisiert ist, kann das FMU aufgerufen und ausgeführt werden. Teilmodelle können damit als FMU in ein Gesamtmodell integriert und gemeinsam simuliert werden. FMU werden zum Modellaustausch zwischen verschiedenen Tools, Domänen und Anwendern verwendet, daneben ist jedoch auch Know-how-Schutz und Kapselbarkeit ein wichtiger Aspekt für die Verwendung von FMU. Da das FMU alle Elemente und Funktionen des Originalmodells enthält, entspricht es diesem 1:1 und die Simulationsergebnisse sind identisch. Um das Ofenmodell als FMU auszuführen, ist im Optimierungsmodul die Integration des FMI notwendig, über welches das FMU ausgeführt wird.

Das Ofenmodell verfügt über keinen Speicher, mit welchem der Ofenzustand von einem Simulationsdurchlauf zum nächsten gespeichert werden könnte. Das ist jedoch auch nicht notwendig, da durch den Optimierer vor jedem Simulationslauf das Modell mit den entsprechenden Parametern initialisiert wird. Die im Projekt realisierte Optimierungstoolchain ist in Abbildung 4 dargestellt.

4 Optimierung

Die vom Simulationsmodell berechneten Daten werden genutzt, um den untersuchten Temperprozess, inklusive der vom Ofen und der Gebläsekammer benötigten elektrischen Energie, vollständig in einem APS-System (Advanced Planning and Scheduling) abzubilden. Ziel des Projektes OptPlanEnergie ist eine Optimierung der Auftragsreihenfolge in Bezug auf den Energieverbrauch, ohne dabei andere, durch den Produktionsprozess vorgegebene, Restriktionen zu vernachlässigen.

Die Auftragsreihenfolge beeinflusst den Energieverbrauch der Temperanlage in zweierlei Hinsicht:

1. Werden zwei Aufträge hintereinander gefahren, die unterschiedliche Ofentemperaturen benötigen, muss der Ofen entsprechend abgekühlt bzw. aufgeheizt werden. Eine Gruppierung der Aufträge, die möglichst wenige Temperaturwechsel induziert, reduziert also den Energiebedarf der Anlage.
2. Die einzelnen Scheiben werden zunächst von einem Mitarbeiter auf dem Aufлагetisch vor der Ofenkammer platziert. Dann werden sie per Barcodescanner im Produktionsleitsystem erfasst, ausgerichtet, geprüft und mit einem Produktionsstempel versehen. Anschließend wird am Leitreehner das entsprechende Rezept gewählt. Dieser Rüstprozess findet statt, während sich der vorherige Auftrag in der Ofenkammer befindet. Dauert dieser Rüstvorgang länger als der Fertigungsvorgang des vorhergehenden Auftrages, entsteht eine Wartezeit, in der der Ofen auf Temperatur gehalten werden muss, was den Energiebedarf des Gesamtprozesses erhöht.

Im APS-Modell des Temperprozesses werden dementsprechend mengenabhängige sowie mengenunabhängige Rüstzeiten, die Überlappung der Fertigungsaufträge und die durch Rezeptwechsel bedingten Aufheiz- und Abkühlzeiten berücksichtigt.

Um die vom Ofenmodell benötigten Eingabedaten und die berechneten Energiebedarfe sowie den Ofenzustand bei der Berechnung der Ofenbelegung berücksichtigen zu können, wird das APS-System so erweitert, dass beliebige nicht-native Modellobjekte gespeichert und im Planungsablauf verwendet werden können. Des

Weiteren wird die Software um eine externe Schnittstelle ergänzt, mit der an vordefinierten Punkten während der Feinplanung Daten mit problemspezifischen externen Modulen ausgetauscht werden können. Im untersuchten Szenario werden während der Rüstoptimierung der aktuelle Ofenzustand, die Planungsdaten des zuletzt geplanten Auftrages und die Menge der Kandidaten mit ihren Grobplanungswerten (z. B. frühester möglicher Start) an ein externes Optimierungsmodul übermittelt, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Das Optimierungsmodul bestimmt die Kosten für mögliche Auftragssequenzen, wobei zur Bestimmung der Energiebedarfe und der damit verbundenen Kosten das Ofenmodell per FMI mit den entsprechenden Startwerten aufgerufen wird. Da, je nach Wahl des Verfahrens, eine große Zahl von Auftragssequenzen simuliert werden muss, ist eine möglichst kurze Antwortzeit des Ofenmodells für die praktische Einsetzbarkeit des untersuchten Ansatzes von entscheidender Bedeutung.

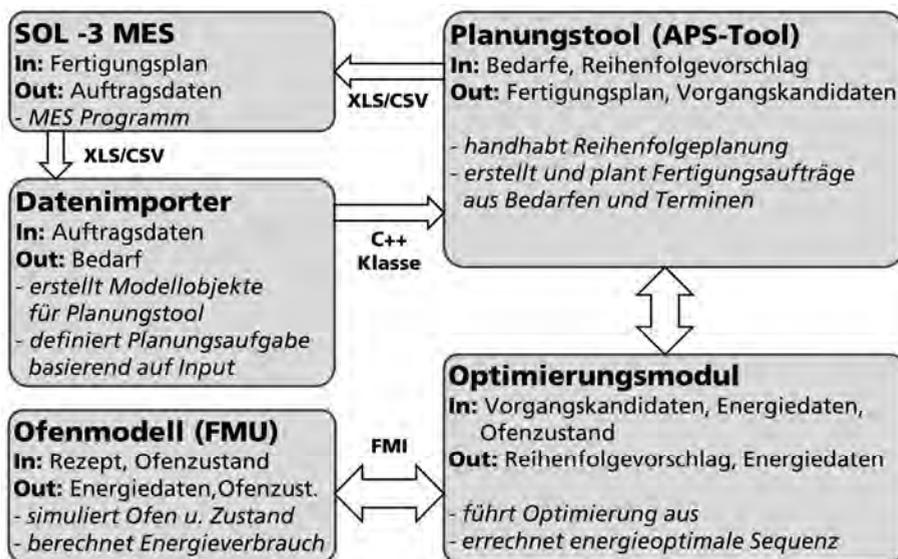


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Datenaustauschs zwischen den Modulen der APS-Toolchain

Die berechneten Energiewerte können grafisch und in Form tabellarischer Reports dargestellt werden, sodass auf ihrer Grundlage Lastspitzen erkannt und Energiefahrpläne erstellt werden können.

Die vorgestellte Erweiterung des APS-Systems um die Berücksichtigung des Energiebedarfes der abgebildeten Fertigungsprozesse ermöglicht somit dem Planer eine gezielte Reduktion des Energiebedarfs und der damit verbundenen Kosten des Produktionsprozesses.

Danksagung

Das Forschungsprojekt OptPlanEnergie – Optimierungsplattform für die energieeffiziente Fertigung – wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1162A/B/C gefördert.

Literatur

- Baumann, F.; Wilson, H.; Seidel, S.; Franke, M.; Gromnitzer, U.: OptPlanEnergie - an optimization and scheduling platform for the energy-efficient production of tempered glass. In: T. Wiedemann (Hrsg.): ASIM 2016, Dresden, 2016, S. 121–124.
- Blochwitz, T.; Otter, M.; Akesson, J.; Arnold, M.; Clauß, C.; Elmquist, H.; Friedrich, M.; Junghanns, A.; Mauss, J.; Neumerkel, D.; Olsson, H.; Viel, A.: Functional mockup interface 2.0. Book of abstracts. 9th International Modelica Conference, München, 2012, S. 173.
- Functional Mock-up Interface. <http://www.fmi-standard.org>. Letzter Zugriff am 13.03.2017.
- Seidel, S.; Donath, U.: Error-free Control Programs by means of Graphical Program Design, Simulation-based Verification and Automatic Code Generation. In: Clauß, C. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Modelica Conference, Technische Universität, Dresden. Linköping: University Electronic Press 2011, S. 628–637.
- SimulationX:ESI ITI GmbH, <http://www.SimulationX.de>. Letzter Zugriff am 20.03.2017.

Prädiktive simulationsgestützte Optimierung von Kältemaschinen im Verbund

Predictive Simulation-based Optimization of Cooling Systems

Ron-Hendrik Peesel, Florian Schlosser, Chris Schaumburg, Henning Meschede,
Universität Kassel, Kassel (Germany), peesel@upp-kassel.de,
schlosser@upp-kassel.de, cschaumburg@student.uni-kassel.de,
meschede@upp-kassel.de

Abstract: Prerequisite for an efficient cooling energy system is the knowledge and the optimal combination of different operating conditions of individual compression chillers. The performance of cooling systems depending on its part load performance and its condensing temperature are often unknown. Recorded energy data remains unused and manufacturers' data differs significantly from the real performance. For this purpose, manufacturer and real data are combined and continuously adapted to form partial load curve models. A predictive optimization algorithm calculates the optimal operating conditions of multiple chillers. The set points from the optimization are continuously validated by a dynamic simulation on the reaction and feedback effects of the system. Finally, a case study of a meat processing plant evaluates different scenarios against the status quo. Applying an optimal chiller loading and condensing temperature increases energy efficiency of up to 24 %.

1 Einleitung

Auf dem Weg zu 80 % weniger Treibhausgasemissionen und 50 % weniger Primärenergieverbrauch bis 2050 setzt die Bundesregierung (2010) insbesondere auf die Steigerung der Energieeffizienz. Der zunehmende Vernetzungsgrad im digitalen Zeitalter ermöglicht den automatisierten und optimierten Betrieb von Versorgungsanlagen. Eine hohe Systemeffizienz ist nur durch ein effizientes und flexibles Versorgungssystem zu erzielen. Voraussetzung dafür ist die stärkere Vernetzung von Querschnittstechnologien, Prozessen und Prozessleittechnik durch das Erfassen und Auswerten von Daten. Im Rahmen der Einführung von Energiemanagementsystemen ist die energetische Ausgangssituation in Unternehmen durch ein Energiedatenerfassungssystem (EDS) aufzunehmen und über geeignete Kennzahlen zu bewerten. Anhand dieser ist die energiebezogene Leistung im kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu steigern (ISO 50001 2011). Häufig werden die entsprechenden Produktions- und Energiedaten mittels eines Energiemonitoringsystems oder über die

Gebäude- oder Prozessleittechnik erfasst. Neben der Visualisierung von Energieströmen und der Zuordnung von Energieverbräuchen zu ihren Verursachern ermöglicht ein EDS, die Energieeffizienz von Anlagen durch die Einführung geeigneter Kennzahlen im Rahmen von über- und innerbetrieblichen Benchmarks zu bewerten.

Weiterführende Datenanalysen finden oftmals nicht statt. So werden große Datenmengen ungenutzt in Datenbanken abgelegt und zur Speicherentlastung zu kleineren Zeitauflösungen (Tages-, Wochen- oder Monatswerten) aggregiert. Dabei beschreiben die Energiedaten das Verhalten der Anlagen in ihrem Betriebsbereich genau. Demgegenüber stehen Hemmnisse vor der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen, weil Wechselwirkungen mit der Produktion und die genaue Kosteneinsparung nicht belastbar prognostizierbar sind. Effizienzpotenziale bleiben unerschlossen.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) geht davon aus, dass durch Effizienztechnologien im Bereich der Gewerkekälte 30-50 % Energieeinsparungen möglich sind (Reinhardt 2016). Dazu bedarf es intelligenter Regelungen, welche einen Verbund aus Einzelanlagen zur Kälteerzeugung unter Berücksichtigung ihrer dynamischen Wechselwirkungen und mit äußeren Randbedingungen im optimalen Betriebspunkt betreiben. Kältemaschinen weisen einen individuellen Betriebsbereich auf, der in Zusammenhang mit Verflüssigungstemperatur und Teillast steht (Yu und Chan 2008). Die Absenkung der Verflüssigungstemperatur hat eine Erhöhung des Coefficient of Performance (COP) um etwa 3 % pro Kelvin zur Folge (Roth 2007). In vielen Fällen sind Kältemaschinen mit unterschiedlichen Betriebseigenschaften zu einer Kältezentrale zusammengeschaltet. Herkömmliche Regelungen sind nicht imstande, selbstständig eine optimale Kombination für unterschiedliche Betriebszustände zu finden. Vor allem die Mitbeachtung der Leistungsaufnahme der Pumpen und Rückkühlssysteme macht die Kältezentrale zu einem komplexen Optimierungsproblem (Yu und Chan 2008).

2 Stand der Wissenschaft

Zum Erschließen des Energieeffizienzpotenzials ist die optimierte Betriebsweise von Kälteerzeugungseinheiten im Verbund mit Hilfe eines Regelalgorithmus umzusetzen. Dynamische Simulationen unterstützen sowohl die Validierung von Effizienzkonzepten vor der Umsetzung als auch die modellbasierte Optimierung (VDI 3633 Blatt 12 2016). Clausen et al. (2015) zeigen, dass die Kopplung von Optimierung und Simulation von Paketsortieranlagen zu Effizienzsteigerungen führt. Diese Methodik ist auf die Effizienzsteigerung von Energieversorgungsanlagen übertragbar. Praktisch umsetzbar ist dies mit einer Modellprädiktiven Regelung (MPC). Diese ermöglicht zum einen die modellgestützte Vorhersage des Systemverhaltens und zum anderen die Implementierung eines Optimierungsalgorithmus, der die optimierten Steuergrößen berechnet. Augenstein (2009) erörtert, dass durch eine einmalige lineare Optimierung der Einsatzstrategie von Kältemaschinen sich der Strombedarf um 11 % reduzieren lässt. Gleichzeitig wird dargestellt, dass sich auch für spezifisch angepasste Expertenregelungsstrategien bei der Inbetriebnahme von Kälteanlagen Optimierungspotenziale ergeben. Veränderungen der Randbedingungen verschieben das Betriebsoptimum einer Anlage im Laufe ihres Lebenszyklus. Das der MPC zugrundeliegende Prognosemodell kann auf Basis der Daten des EDS selbstlernend gestaltet werden (Lautenschlager und Lichtenberg 2016). Hovgaard et al. (2012) zeigen am Beispiel

einer Supermarkt-Kälteversorgung, dass mit Hilfe von MPC Einsparungen von 9-32 % durch die Nutzung eines thermischen Speichers, Vorhersagen der wechselnden Last und unter Berücksichtigung variierender Energiepreise möglich sind. Olson und Liebmann (1990) beschreiben einen mathematischen Ansatz zur Verteilung der Lasten auf mehrere Kältemaschinen zur Minimierung der Energiekosten. In der simultanen Optimierung von Kältemaschinen und Kühltürmen werden auch Mehrzieloptimierungen mit Genetischen Algorithmen angewendet (Sayyaadi und Nejatolahi 2011). Verschiedene Methoden zur Optimierung der Teillastregelung sind in der Literatur beschrieben, wie zum Beispiel die Branch-and-Bound Methode (Chang et al. 2005a), Dynamische Programmierung (Chang 2006), Gradientenmethode (Chang et al. 2010), Genetische Algorithmen (Chang et al. 2005b), Evolutionäre Algorithmen (Chang 2007), Simulated Annealing (Chang und Yung-Chung 2006) und Particle Swarm Optimierung (Lee und Lin 2009). Unbeachtet bleibt die Abhängigkeit des Wirkungsgrades einer Kältemaschine von Teillastzustand und Rückkühltemperatur für einen Zeithorizont von mehreren Stunden. Bisherige Untersuchungen auf diesem Gebiet widmen sich der Erstellung von Fahrplänen für die Einschaltreihenfolge von Kälteverbundsystemen auf Basis eines linearen Optimierungsalgorithmus (Brenner et al. 2014).

Der Innovationsgrad dieses Beitrages besteht in der Betrachtung der Wechselwirkungen von optimaler Verflüssigertemperatur und Teillastwirkungsgrade der Kältemaschinen mithilfe von Energiedaten. Auf dieser Grundlage ermöglicht die Kopplung von Optimierung und energetischer Simulation des Systems eine energieeffiziente Versorgung von Kühlprozessen.

3 Methodik und Modellierung

Dieser Abschnitt beschreibt die Methodik und die Modellierung der Systeme unter Verwendung einer modellbasierten prädiktiven Optimierung unter Berücksichtigung des individuellen Betriebsverhaltens und des dynamischen Verhaltens eines Kälteversorgungssystems.

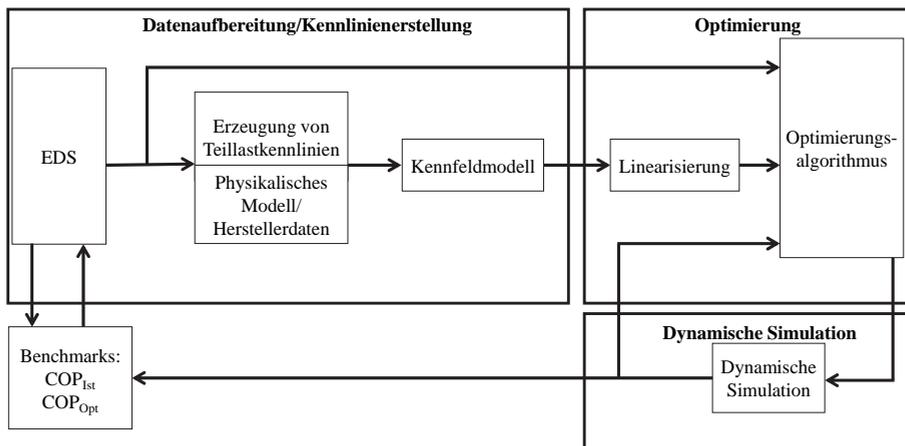


Abbildung 1: Methodik der simulationsgestützten Optimierung mit Realdaten

In Abbildung 1 ist die Vorgehensweise, unterteilt in die Bereiche Datenaufbereitung/Kennlinienerstellung, Optimierung und dynamische Simulation, dargestellt. Die Teilbereiche werden im Folgenden näher beschrieben.

3.1 Datenaufbereitung und Kennlinienerstellung

Ein EDS sammelt Informationen über das Verhalten eines Energieversorgungssystems über die vorliegenden Betriebsbereiche. Mithilfe einer geeigneten Schnittstelle werden relevante Betriebszustände und -größen der Kältemaschinen und Umgebungsdaten abgerufen. Die Bildung der Kennfelder erfolgt durch die Zuordnung des gemessenen COP zu variierenden Teillastzuständen und den entsprechenden Verflüssigertemperaturen. Diese Kennfelder bilden bei konstanter Betriebsführung lediglich einen Auszug des gesamten Betriebsbereichs der Anlage ab und beinhalten nur selten den optimalen Betriebspunkt. Ebenso bilden die Herstellerangaben nur das Anlagenverhalten in bestimmten Betriebspunkten unter Standardtestbedingungen, z. B. im Auslegungspunkt, ab. In Abbildung 2 ist die Leistungszahl in Abhängigkeit des Teillastverhaltens für die Herstellerdaten in schwarz und für die realen Anlagendaten in grau dargestellt.

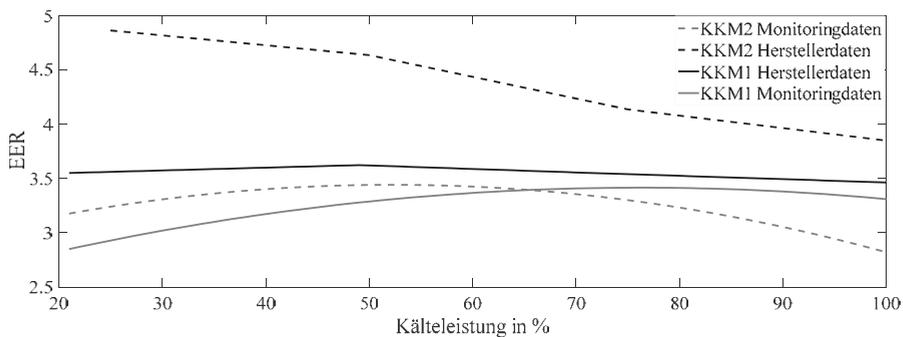


Abbildung 2: Teillastverhalten von Kältemaschinen bei konstanter Kondensations-temperatur von 26 °C

Die Abweichung im Betriebsverhalten unterstreicht die Notwendigkeit für die Integration von Realdaten zur modellbasierten Optimierung der Einsatzregelung eines bestehenden Systems. In der Realität zeigt sich, dass selbst zwei baugleiche Maschinen am gleichen Aufstellungsort ein unterschiedliches Leistungsverhalten aufweisen können (Brenner et al. 2014). Daher besteht der Bedarf an einem physikalischen Modell, welches auf teilempirischen Beschreibungsformeln beruht. Die Parameter des Modells werden sowohl über die vorliegende Datenbasis als auch durch die extrahierten Teillastkennlinien adaptiert. Die Kopplung der Datenbank des EDS mit der Modellierung ermöglicht die fortlaufende Aktualisierung der Kennfelder und steigert somit die Güte der Modelle.

3.2 Mathematische Modellierung

Die Optimierung ist als gemischt ganzzahliges lineares Programm formuliert. Ausschlaggebend für die Wahl dieser Art von Optimierung sind die Betriebszustände

der Kältemaschinen, die sich nur diskret ansteuern lassen und somit ganzzahlige Lösungen voraussetzen. Im ersten Schritt erfolgt eine eigenständige Optimierung der elektrischen Leistungsaufnahme des Trockenkühlers in Abhängigkeit der Rückkühltemperatur. Die Wahl der Rückkühltemperatur stellt einen Kompromiss zwischen erhöhter Leistungsaufnahme des Kühlturmgebläses zur Erhöhung des Wärmeübergangs und der elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters dar, um auf eine entsprechende Kondensationstemperatur zu verdichten. Im zweiten Schritt ist eine geeignete Aufteilung der Kälteleistung für die optimalen Betriebszustände der Kältemaschinen im Verbund das Ziel.

Die allgemeine Formulierung der Kostenfunktion lautet:

$$\min c^T x \quad (1)$$

Vektor x enthält ausschließlich binäre Einträge, die wiedergeben, welche in Vektor c definierten Zustände aktiv sind.

In Bezug auf die erste Optimierung wird dem Vektor c die elektrische Leistungsaufnahme des Trockenkühlers und der Kältemaschinen zugeordnet. Die Gesamtsumme der elektrischen Leistungsaufnahmen gilt es zu minimieren. Jede Kältemaschine erhält zu jeder potenziell möglichen Kühlwassertemperatur einen Eintrag der elektrischen Leistung in c . Die weiteren Einträge entfallen auf die elektrischen Leistungsaufnahmen des Trockenkühlers bei unterschiedlichen zu erbringenden Kühlwassertemperaturen.

Die elektrischen Leistungen des Trockenkühlers für unterschiedliche Kühlwassertemperaturen werden einer Kennlinie entnommen, die auf Daten des EDS basiert. Die Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahmen der Kältemaschinen basiert auf folgendem modifizierten Zusammenhang von Yu und Chan (2005).

$$\Delta P_{el} = \frac{CC}{a \cdot PLR^b \cdot \Delta T_{cd}} \quad (2)$$

Darin sind Kälteleistung (CC), Teillastpunkt (PLR) und Kühlwassertemperatur (T_{cd}) enthalten. Die Koeffizienten a und b werden individuell auf Basis der Daten des EDS angepasst.

Aus dem Ergebnis der Optimierung lässt sich die für den aktuellen Zeitpunkt optimale Kühlwassertemperatur ableiten.

Die zweite Optimierung minimiert den Gesamtenergieverbrauch der Anlage bei der vorher bestimmten Kühlwassertemperatur durch Berechnung einer Folge der optimalen Betriebszustände eines Kältemaschinenverbunds mit J Anlagen für N zeitdiskrete Berechnungsschritte. Vektor c ordnet hier jedem Betriebszustand einer jeden Kältemaschine eine elektrische Leistung zu. Die Betriebszustände der Kältemaschinen können dabei in Ein-Prozent-Schritten im Bereich von 0-100 % gewählt werden. Der minimale Prozentwert ist von der jeweiligen Kältemaschine abhängig. Zusätzlich werden für jeden Berechnungsschritt Startkosten für jede Kältemaschine berücksichtigt, um den höheren Strombedarf häufiger Schaltzyklen zu berücksichtigen. Der in Summe in allen N Zeitschritten zu erbringende Kältebedarf wird der Optimierung als Bedingung vorgegeben.

3.3 Simulationsmodell

Für die Implementierung der in Abbildung 1 visualisierten Methodik wird auf MATLAB®/SIMULINK®, welches sich durch die problemlose Kopplung zwischen Optimierung und Simulation auszeichnet, zurückgegriffen. SIMULINK® bietet die Möglichkeit, eine dynamische Simulation auf Basis von grafischen Blöcken durchzuführen. Die Simulation baut auf den erstellten Kennlinienmodellen auf und stellt ein Abbild der Realität dar. Die Ergebnisse der Optimierung werden als Sollwerte der Regelgrößen an die Simulation übermittelt und somit die Reaktion und die Rückkopplungseffekte des Systems überprüft. Bestehend aus zwei Kältemaschinenmodellen, einem thermischen Kaltwasserspeichermodell und einem Ventilmodell berücksichtigt die Simulation die dynamischen Wechselbeziehungen zwischen den Anlagen, thermische Trägheiten und das Anfahrverhalten. Auf diese Weise werden die Einschränkungen der linearen Optimierung kompensiert. Für die nächsten Prädiktionen werden die aktuellen Maschinenzustände und der Speicherstand aus der Simulation rollierend an die Optimierung übergeben und Abweichungen im Verhalten der Anlagen korrigiert.

4 Fallstudie

Zur Anwendung und Validierung der Optimierung und des Simulationsmodells wird auf die EDS-Daten eines fleischverarbeitenden Betriebes zurückgegriffen. Es handelt sich um einen mittelständischen Betrieb in Deutschland mit einer jährlichen Produktionsmenge von 1200 t. Es werden Roh-, Koch- und Brühwurst hergestellt. Hierzu wird das Rohmaterial in passende Stücke geschnitten und kalt gelagert. Anschließend erfolgt die Weiterverarbeitung, je nach Endprodukt, mittels Kutter oder Fleischwolf. Darauf folgend werden die Fleischerzeugnisse gekocht oder direkt im Reiferaum gereift. Vor dem Verpacken und Versenden der Ware werden alle Wurstprodukte im Kühlraum gelagert. Zur Lagerung der Fleischprodukte ist eine Kaltwassertemperatur von -7 °C vorgegeben, welche nicht angepasst werden kann. Die Kältezentrale setzt sich aus zwei Kältekompressionsmaschinen unterschiedlicher Leistung, einem Trockenkühler zur Rückkühlung der Kältemaschinen und einem Kaltwasserspeicher als hydraulische Weiche zusammen. Die drehzahlvariablen Kältemaschinen weisen eine Kälteleistung von 210 kW und 170 kW im Auslegungspunkt auf. Die Kältemaschine mit der größeren Leistung wird konstant in Volllast betrieben. Für die Kältemaschinen mit 170 kW wird die Kältebereitstellung an den variierenden Kältebedarf angepasst. Zusätzliche Anwendung findet die Kältebereitstellung in der Raumkühlung, Klimatisierung und Prozesskühlung.

5 Szenarien und Ergebnisse

Zur Ermittlung des Einflusses der Teillast und der Rückkühltemperatur für die Optimierung sind die drei Szenarien Basisszenario (BS), Teillastoptimierung (TL) und Teillastoptimierung mit Rückkühloptimierung (RTL) definiert. Zur Berücksichtigung von unterschiedlichen Außentemperaturen werden die Simulationen in allen drei Szenarien für einen kühlen und einen warmen Zeitraum von einer Woche im Jahr durchgeführt. Alle Optimierungen haben einen Prädiktionshorizont von fünf Stunden. In Tabelle 1 sind die Unterschiede der Szenarien beschrieben und die Einsparungen der

prädiktiven simulationsgestützten Optimierung von Kältemaschinen im Verbund zusammengefasst. Die Einsparungen der Szenarien beziehen sich auf das Basisszenario BS.

Tabelle 1: Definition der Szenarien und Ergebnisse

	Szenario BS	Szenario TL	Szenario RTL
Rückkühltemperatur	konstant 26 °C	konstant 26 °C	außentemperaturabhängig
Lastverteilung	KKM2 konstant KKM1 variabel	teillastoptimiert	teillastoptimiert
Energieeinsparungen	-	0,9-2,9 %	-20-23,79 %

In Abbildung 3 sind exemplarisch für einen Zeitraum von 48 Stunden und das Szenario TL der Kältebedarf und die entsprechende Modulation der Kältemaschinen bei konstanter Außentemperatur dargestellt. Zusätzlich ist die elektrische Leistung beider Kältemaschinen für das Basisszenario und die Optimierung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die Optimierung der Teillastzustände in den kalten Monaten eine höhere Energieeinsparung erzielt wird. Im kalten Zeitraum ist der Kältebedarf geringer und somit arbeiten die verwendeten Kältemaschinen häufiger mit einer optimalen Leistungszahl. Die prozentualen Einsparungen belaufen sich für einen kalten Zeitraum auf 2,9 % und für einen warmen Zeitraum auf 0,9 %.

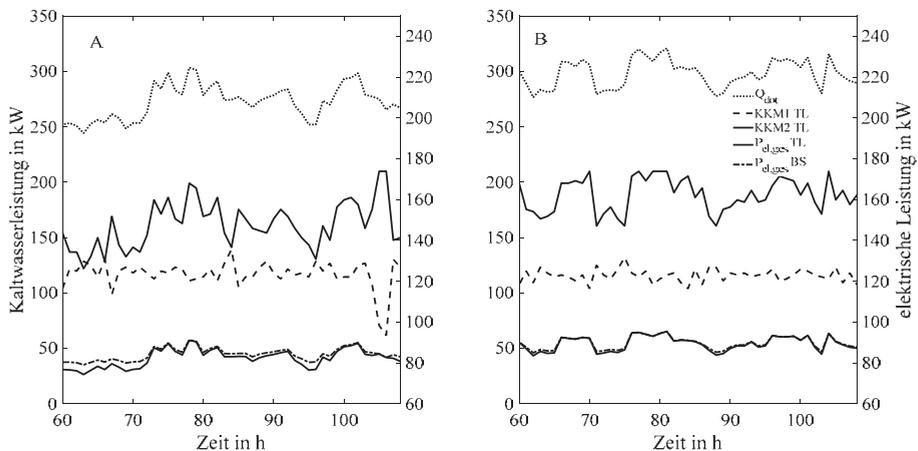


Abbildung 3: Teillastoptimierung mit konstanter Rückkühltemperatur 26 °C für einen kalten Zeitraum (A) und einen warmen Zeitraum (B)

Je nach Verdichterart und -anzahl variiert die Lage des Betriebsoptimums, und es ergeben sich andere Energieeinsparpotenziale. In der folgenden Abbildung 4 wird analog zu Abbildung 3 die außentemperaturabhängige Teillastoptimierung dargestellt.

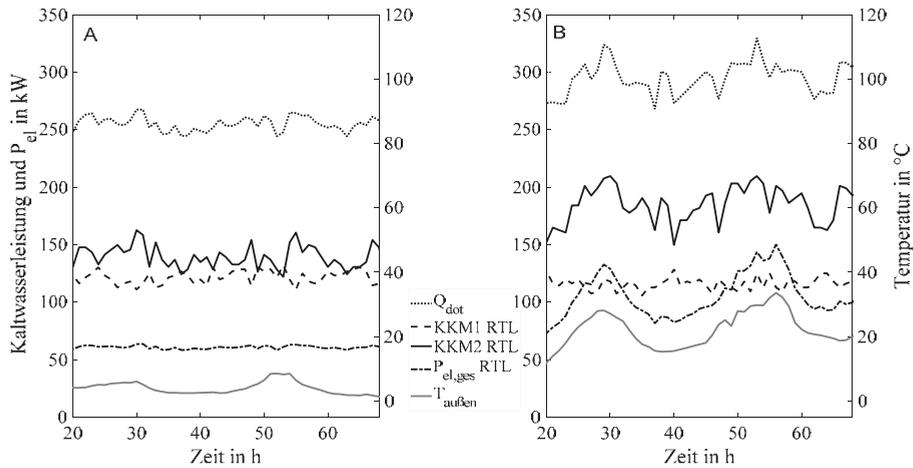


Abbildung 4: Außentemperaturabhängige Teillastoptimierung für einen kalten Zeitraum (A) und einen warmen Zeitraum (B)

Aufgrund des starken Einflusses der Rückkühltemperatur auf die Effizienz der Kältemaschinen ist das Energieeinsparpotenzial mit 23,8 % im kalten Zeitraum am größten, wohingegen in den warmen Monaten keine Einsparungen erzielt werden. Zeitweise ist ein erhöhter elektrischer Energieverbrauch möglich. Die Anpassung der Rückkühltemperatur führt zu einer Effizienzsteigerung, welche an der geringeren elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters beim Verdichten auf die entsprechende Kondensationstemperatur liegt. In der kalten Periode wird fast dauerhaft eine optimale Rückkühltemperatur von 18 °C erreicht. In der warmen Periode steigt bei hohen Außentemperaturen die Rückkühltemperatur an und reduziert die Effizienz der Anlage. Das Einsparpotenzial der außentemperaturabhängigen Teillastoptimierung ist stark von der Außentemperatur abhängig.

6 Fazit und Ausblick

Im vorgestellten Kälteversorgungssystem aus mehreren Kältemaschinen besteht ein Energieeinsparpotenzial von 23,79 % mittels der Teillastoptimierung und der Anpassung der Rückkühltemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur. Die prädiktive simulationsgestützte Optimierung eignet sich zur Erschließung des Einsparpotenzials unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens eines Kälteversorgungssystems. Die starken Abweichungen der Leistungsdaten der Kältemaschinen bedingen die Verwendungen von Realdaten eines Energiedatenerfassungssystems. Vorteilhaft für die Implementierung der Optimierungsstrategie in einem industriellen Versorgungssystem ist, dass nur eine Anpassung der Regelung notwendig ist. Im Weiteren ist der Einfluss eines größeren Speichersystems auf das Energieeinsparpotenzial der Optimierung zu prüfen. Die Erprobung weiterer Optimierungsalgorithmen zur Bestimmung des optimalen Verhältnisses von Genauigkeit und Rechenaufwand ist der Fokus zukünftiger Arbeiten. Vor der tatsächlichen Implementierung der Optimierungsstrategie ist diese auf einer Laboranlage zu erproben.

Danksagung

Die Autoren danken der Rud. Otto-Meyer-Umwelt-Stiftung für die Förderung der Forschungsarbeit mit Finanzmitteln für dieses Projekt.

Literatur

- Augenstein, E.: Betriebsoptimierung von Kältezentralen – Einsparpotentiale durch situationsabhängige Einsatzregeln. KKA Kälte Klima Aktuell Sonderausgabe Großkältetechnik (2009), S. 4.
- Brenner, A.; Kausch, C.; Kirschbaum, S.; Lepple, H.; Zens, M.: Effizienzsteigerung in einem komplexen Kühlwassersystem (2014), S. 1-6.
- Bundesregierung, 2010: Ziele der Energiepolitik der Bundesregierung. Hg. v. Bundesregierung.
https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html#doc605764bodyText2. Letzter Zugriff am 28.02.2017.
- Chang; Yung-Chung: An innovative approach for demand side management—optimal chiller loading by simulated annealing. *Energy* 31 (2006) 12, S. 1883–1896.
- Chang, Y.-C.: An Outstanding Method for Saving Energy—Optimal Chiller Operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21 (2006) 2, S. 527–532.
- Chang, Y.-C.: Optimal chiller loading by evolution strategy for saving energy. *Energy and Buildings* 39 (2007) 4, S. 437–444.
- Chang, Y.-C.; Chan, T.-S.; Lee, W.-S.: Economic dispatch of chiller plant by gradient method for saving energy. *Applied Energy* 87 (2010) 4, S. 1096–1101.
- Chang, Y.-C.; Lin, F.-A.; Lin, C.H.: Optimal chiller sequencing by branch and bound method for saving energy. *Energy Conversion and Management* 46 (2005a) 13-14, S. 2158–2172.
- Chang, Y.-C.; Lin, J.-K.; Chuang, M.-H.: Optimal chiller loading by genetic algorithm for reducing energy consumption. *Energy and Buildings* 37 (2005b) 2, S. 147–155.
- Clausen, U.; Diekmann, D.; Baudach, J.; Pötting, M.: Mathematischen Optimierung und Simulation von Paketsortieranlagen – Bessere Lösungen durch Kopplung der beiden komplementären Methoden. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in production and logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 279–288.
- Hovgaard, T.G.; Larsen, L.F.; Edlund, K.; Jørgensen, J.B.: Model predictive control technologies for efficient and flexible power consumption in refrigeration systems. *Energy* 44 (2012) 1, S. 105–116.
- ISO 50001: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Deutsche Norm: Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung; Deutsche Fassung EN ISO 50001:2011*. Berlin: Beuth 2011.
- Lautenschlager, B.; Lichtenberg, G.: Data-driven Iterative Learning for Model Predictive Control of Heating Systems. *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016) 13, S. 175–180.
- Lee, W.-S.; Lin, L.-C.: Optimal chiller loading by particle swarm algorithm for reducing energy consumption. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 8-9, S. 1730–1734.

- Olson, R.T.; Liebmann, J.S.: Optimization of a chilled water plant using sequential quadratic programming. *Engineering Optimization* 15 (1990) 3, S. 171–191.
- Reinhardt, S., 2016: Die Nationale Klimaschutzinitiative: Förderung der Kälte- und Klimatechnik zur Erreichung der Klimaschutzziele. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Roth, P.: Energieeinsparung auf der Hochdruckseite einer Kälteanlage. Hg. v. Güntner AG & Co. KG, 2007.
- Sayyaadi, H.; Nejatolahi, M.: Multi-objective optimization of a cooling tower assisted vapor compression refrigeration system. *International Journal of Refrigeration* 34 (2011) 1, S. 243–256.
- VDI 3633 Blatt 12: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Simulation und Optimierung. Entwurf. Berlin: Beuth 2016.
- Yu, F.W.; Chan, K. T.: Experimental determination of the energy efficiency of an air-cooled chiller under part load conditions. *Energy* 30 (2005) 10, S. 1747–1758.
- Yu, F.W.; Chan, K. T.: Optimization of water-cooled chiller system with load-based speed control. *Applied Energy* 85 (2008) 10, S. 931–950.

Simulating the Energy Consumption of Machines in Compound Feed Manufacturing for Investment Decisions

Simulation des Energieverbrauchs von Maschinen in der Mischfutterproduktion zur Unterstützung bei Investitionsentscheidungen

Daniel Rippel, Michael Lütjen, University of Bremen, BIBA – Bremer Institut für
Produktion und Logistik GmbH, Bremen (Germany), rip@biba.uni-bremen.de,
ltj@biba.uni-bremen.de

Marc Allan Redecker, André Decker, University of Bremen, BIK – Institut für
integrierte Produktentwicklung, Bremen (Germany), maalre@uni-bremen.de,
decker@uni-bremen.de

Michael Freitag, Klaus-Dieter Thoben, University of Bremen, Bremen (Germany),
fre@biba.uni-bremen.de, tho@biba.uni-bremen.de

Abstract: The manufacturing of compound feed is subject to highly dynamic influences. On the one hand, compound feed is usually manufactured in a make-to-order production mode, whereby a great variety of ingredients can be used to manufacture the same end product. In the use case presented, the energy consumption of the manufacturing process constitutes a major factor for an efficient production. This contribution presents an approach to learn process- and corresponding simulation models from historic production data, which enable an estimation of the respective energy consumption. Therefore, the modelling method ‘Micro – Process Planning and Analysis’ is extended and applied to this use case. As a result, the article presents a simulation study to assess the energy efficiency of different types of presses. The conducted simulation study shows highly different efficiencies with respect to different types of presses based on a dataset covering several years of production.

1 Introduction

During the last decades, a continuous trend towards customer driven markets can be observed. As a result, an increasing number of companies focus on make-to-order production modes, whereby products are manufactured based on customer demands (Kuo et al. 2016). Such production modes are faced with high dynamics when it comes to production planning and scheduling. Moreover, investment decisions, e.g. for new machines or workstations, cannot be made simply based on the actual product

portfolio but need to incorporate information about the structure, types and frequencies of customer orders. This article investigates the use-case of an agriculture company producing compound feed in a make-to-order manner for an agricultural cooperative society. Thereby, customers usually place orders on the same day the product is manufactured. As market prices for raw materials vary, the composition of products can change for each order on a daily basis, resulting in strong dynamic influences on the products configurations. In terms of the presented use case, a reduction of energy costs presents a major objective for an efficient production. At this, the energy costs vary for different raw materials and product compositions, as some can be processed more efficiently than others. Moreover, energy costs strongly depend on the chosen types of machines, which in this case refer to grinders or presses. This article focusses on methods to learn suitable process models to combine discrete-event simulation of logistic processes with cause-effect networks. This enables an estimation of the energy costs based on available raw materials and machines. In terms of production planning, the resulting simulation models can be used to select the most efficient machines for each order. Moreover, the article presents an approach to support investment decisions by simulating the expected energy costs for machines using larger sets of historic production data to capture the customer behaviour.

1.1 Process Chain Planning, Configuration and Simulation

Within the literature, there are only very few approaches which allow a combined planning and configuration of process chains. During the last years, different articles focused on the configuration of specific processes (cf. Afazov 2013). Thereby, the configuration relies on detailed studies of the corresponding processes and is usually supported by very detailed physical models in form of finite element simulations (e.g. Afazov et al. 2012; Pietrzyk et al. 2008). Another approach found in the literature focusses on the use of sample data (historical or experimental) as templates for the configuration (e.g. Sabotin et al. 2009). Although both approaches enable a precise configuration of single processes, they cannot be transferred to other processes or products easily. In the context of process chain planning, classic methods like event-driven process chains or the Unified Modelling Language (UML) are used commonly. Whereas these methods do not include the configuration of processes, Denkena et al. (2006) proposed an approach that indirectly addresses this topic. This approach builds upon the modelling concept for process chains (Denkena and Tönshoff 2011), whereby operations are interconnected by so called technological interfaces. In general, these describe sets of pre- or post-conditions for each operation. Although this approach enables configuration of the processes, the creation of these models requires a very detailed insight into the processes.

1.2 Simulation Model Generation

Most of the methods described before rely on specifically designed process models for the configuration and design of process chains. Nevertheless, the potential of a (semi-) automated generation or learning of simulation models is comparably high. According to studies, about 80 percent of the efforts involved in a simulation study can be automated (Baier and Krieg 2008). In general, this topic has been part of scientific research in the context of the digital factory concept during the last decade (Wenzel 2009). Basically, two different approaches to generate simulation models

exist. Data-driven methods rely on data mining techniques to instantiate or configure simulation models (Huang et al. 2011), while other methods such as graphical modelling methods use specific notations to create the underlying simulation models. In this context, a number of different graphical modelling or transformation approaches exist, which either extend current modelling languages (e.g. Batarseh and McGinnis 2012) or provide adapted meta-models (e.g. Cetinkaya et al. 2010). Usually, these methods focus on the material flow and thus do not allow to assess specific characteristics or parameters like energy consumption based on changing inputs, like varying raw materials.

2 Modelling Framework and Methodology

In order to build the simulation models, this article investigates the method transfer of the “Micro Process Planning and Analysis” (μ -ProPIAn) Methodology (Rippel et al. 2014a) for the estimation of energy costs in the production of compound feed. The methodology itself allows using both expert knowledge as well as data mining techniques to create process models and to generate simulation models based on these. While the methodology is originally being developed for micro manufacturing (c.f. Rippel et al. 2014b; Rippel et al. 2016), it provides a set of tools to model, characterize and evaluate process chains that are subject to high variations and difficult to describe influential factors (Rippel et al. 2017) using statistical as well as predictive models. Therefore, the methodology uses so-called cause-effect networks to characterize interrelations between production relevant factors. Using these cause-effect networks, process chains can be developed and evaluated regarding their economic and technical feasibility using discrete-event material flow simulations directly generated from these process models.

The modelling notation consists of three different views, corresponding to different levels of detail. The first view focusses on the top-level process chains. This view’s notation closely follows the classic notation of process chains (please reference (Denkena and Tönshoff 2011) for more details). As an extension to the classical approach, all process elements are connected using process interfaces. These interfaces also include logistic parameters in addition to the original technical parameters. The material flow view further describes operations by assigning material flow objects that are used to conduct the operation (e.g. machines/devices, work pieces, tools, operating supplies or workers). This enables the modelling of specific production scenarios with specified resources and allows an evaluation of the models regarding logistic aspects. At this, μ -ProPIAn offers the option to conduct discrete-event material flow simulations based on the specified production system and the modelled process chains. The third view focusses on the configuration of the processes and process chains using cause-effect networks to describe the inter relationships between relevant process parameters. Each network consists of a set of parameters and a set of cause-effect relationships, forming a directed graph. The set of parameters consists of all technical and logistic characteristics that are relevant to describe the object’s influence on the production process. In case of work pieces these can be material properties or costs per unit. As for processes, these include production rates, forces or other characteristics that can be set, calculated or measured (Fig. 1a). From a modelling perspective, cause-effect networks are hierarchical. Each material flow object (work pieces, machines, tools, etc.) holds its own cause-effect network,

or at least a set of describing parameters. When combining these single elements to operations, process elements or process chains, higher level cause-effect networks are created by describing additional relationships between the parameters of the networks or by connecting them to previously specified process interfaces (Fig. 1b).

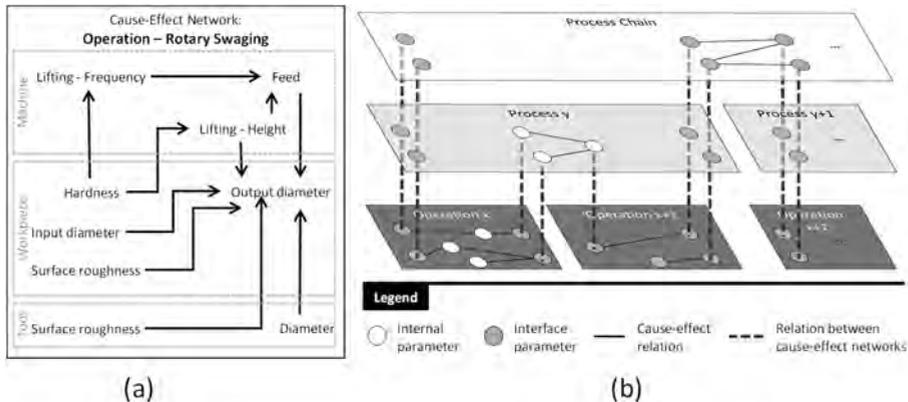


Figure 1: (a) Composition of an operation (according to Rippel et al. 2014b)
(b) Composition of higher level cause-effect-networks (Rippel et al. 2014a).

The creation of cause-effect networks is divided into two steps: the qualitative modelling and the quantification. The quantitative model of the network is created by collecting all relevant parameters and denoting their influences among each other (Fig. 3a). The quantification as second step, focusses on enabling the propagation of different parametrisations throughout the network. In case of well-known relations, μ -ProPIAn allows to enter mathematical formulas directly. In addition, it offers the capabilities to quantify cause-effect relations from experimental- or production-data by applying methods from the areas of data mining (e.g. artificial neural networks, support vector machines, regression trees or local regression methods) and statistics (e.g. linear or polynomial least-square regressions). For a more detailed description of these methods, please refer to Rippel et al. (2014a) and Rippel et al. (2014b).

3 Use Case Description and Simulation Study

To enable the generation of simulation models, suitable process models have to be created. In a first step, the overall process chain is being developed. In this use case, the process chain consists of two relevant processes: Grinding and Pressing. In a second step, the involved resources are incorporated into the model. The third step consists of the creation and quantification of the corresponding cause-effect networks to obtain suitable process models for the simulation.

3.1 Use Case: Manufacturing of Compound Feed

Compound feed manufacturers focus on the refining of raw materials like grains to animal feed like flour, pellets or crumb feed. The described compound feed manufacturer is a service provider mainly producing feed for an agricultural

cooperative society. This society provides the recipes for the products, buys the raw materials and retails the end products. The compound feed manufacturer produces the products for fixed prices and the only opportunity to maximise the profit is to save energy and therefore energy costs. Due to the variety of costumers, the compound feed manufacturer produces 119 different feed recipes with over 60 different ingredients by daily variation of components and short-term orders by customers. At this, the energy consumption fluctuates strongly, as different feed recipes are manufactured with different machine parameters.



Figure 2: Pellets leaving the press (DVT 2017).

When compound feed processing starts, the ingredients are automatically dosed and weighed based on the feed recipe. The manufacturing begins with the grinding of the raw materials. There are two different possibilities to grind the raw materials: either by the use of hammer mills or in a combination of hammer mills and roller mill. The major difference is the feed-flour. If the feed-flour is produced by the use of hammer mills, the particles are fine-grained, whereas a feed-flour produced using the roller mill has a rougher particle size. The different grain sizes thereby influence the energy consumption and the steam conditioning during the pressing process. In a second process step, the flour is pressed into the required shapes (usually pellets as shown in Fig. 2). Therefore, the company described uses three different presses each with interchangeable matrices. These matrices define the diameter and the length of the pellets. Consequently, the presses configuration (matrix, tantrum distance) must be adjusted to fit the corresponding feed recipe, resulting in different throughput rates. Each machine is equipped with energy measurement systems, to monitor its energy consumption. In addition, three diode array based spectrometers (NIR) are installed to acquire characteristics of the ingredients and products like the humidity, protein or fat contents. These parameters are measured after the delivery of the raw materials, the grinding process and the pressing process. Another measurement system is the computerized particle analyser (CPA) which is integrated after the grinding process to analyse the grain size before the pressing process. The aim of these sensors is to provide a sufficient amount of information for the development of a control system, which optimizes the energy consumption throughout the process chain while retaining a sufficient product quality.

3.2 Cause-Effect-Network (Process Model)

Using the description of the process and a dataset of 2297 production runs, several relevant objects and parameters are integrated into the model. The overall objective of this model is the estimation of the energy consumption, focussing on the pressing process. Fig. 3 shows the resulting (simplified) qualitative cause-effect network. For this cause-effect network, the energy consumption is divided into the energy consumption of the pressing and the additional energy consumed by adding steam during pressing. The latter depends on the targeted temperature of the steam (usually 90°C) that is added, as well as the temperature and humidity of the used flour. The energy consumption of the pressing depends on the throughput and the overall duration. Thereby, these values depend on the total amount of flour used as well as on its characteristics in terms of grain uniformity and average grain sizes. On the material side, the dataset lists 119 different ingredients. A single product is related to an average of 23 of these ingredients, which can be used in different combinations and amounts. During grinding, these ingredients are processed into flour, whereby the flour's grain sizes (normally distributed) and humidity basically depend on the type and amount of raw ingredients used in its preparation.

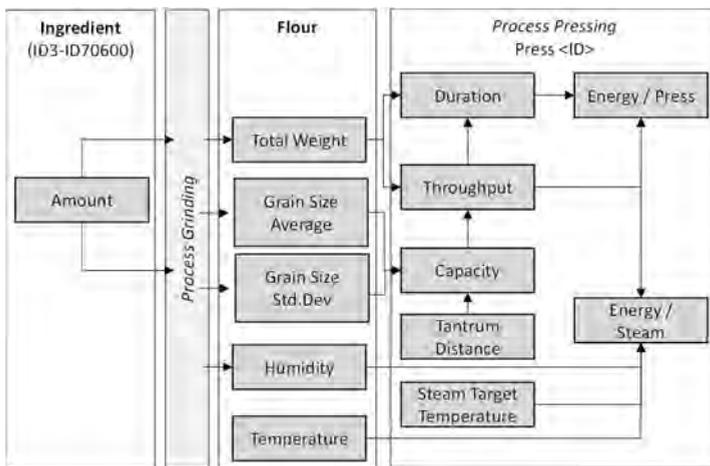


Figure 3: Simplified Cause-Effect-Network for the Pressing Process

The datasets used in this study incorporate production data of three different presses. Therefore, the μ -ProPIAn model incorporates three production devices, corresponding to one type of press. Each of these presses is assigned the previously described cause-effect network and is quantified using the corresponding entries of the dataset. In addition to the production devices, two types of workpieces are modelled: the flour and the ingredients. While the flour element is simply assigned the corresponding parameters as shown in Figure 3, all ingredients are subsumed in a single workpiece model element, which is then assigned one parameter for each of the relevant ingredients. These parameters describe the amount of that specific ingredient used. While this diverts from the usual way μ -ProPIAn models are designed, it strongly reduces the amount of material flow elements and thus the effort in creating the corresponding process model. Moreover, in terms of the simulation study described

in the next section, this drastically eases the creation of different scenarios, as adding and removing material flow elements has yet to be performed manually within μ -ProPIAn, while the method can easily be extended to load and calculate different parametrisations directly. To further simplify the model, the grinding process is not incorporated into the models. Thus, the flour's grain statistics (mean and standard deviation) as well as the humidity are estimated directly, based on the used ingredients. The flour's total weight is calculated by adding up the single amounts and the process duration is calculated by dividing the total amount by the throughput rate. To quantify the remaining parameters, regression models are learned. Table 1 summarizes these models. The column "model" describes the model used for the parameter. In this use case, all parameters are either defined using a formula or using a locally weighted linear regression model (LWL) for their prediction. The LWL models are learnt using an Epanechnikov smoothing kernel spanning an average of at least 64 neighbouring sample points within the dataset. The column "Cor." depicts the regression's Pearson product-moment correlation coefficient. The column "Err." provides the models root mean squared error. Both values are derived using a ten-fold cross validation over the training sets. In order to approximate the flour's characteristics based on different combinations of ingredients, the complete dataset is used as training set. In contrast the three different models for the press types, only a single model was learned and is provided in the first two columns of Table 1.

Table 1: Configuration of the cause-effect network

			Press 1		Press 2		Press 3	
	Parameter	Model	Cor.	Err.	Cor.	Err.	Cor.	Err.
Flour	Weight	Sum of ingredients	-	-	-	-	-	-
	Grain Size (avg)	LWL	0.79	0.27	-	-	-	-
	Grain Size (Std.Dev)	LWL	0.63	0.11	-	-	-	-
	Humidity	LWL	0.84	0.92	-	-	-	-
	Duration	Amount / Throughput	-	-	-	-	-	-
	Pressing	Throughput	LWL	0.98	2.36	0.87	4.16	0.91
Energy Steam		LWL	0.68	7.74	0.82	9.67	0.84	8.49
Energy Pressing		LWL	0.88	11.90	0.59	2.51	0.72	1.19

4 Simulation and Framework Extension

While the model described in the last section can be used for the selection of a specific resource during production, it provides the opportunity to assess the overall efficiency of specific type of press. As the company considered in this use case is heavily involved in a make to order production mode, the efficiency cannot be assessed

without regarding the types and structures of customer orders. In order to compare the energy efficiency of different types of presses, this section describes a simulation study conducted using the process model derived in section 3.

4.1 Framework extension

To perform these simulations, μ -ProPIAn's change propagation module is extended. In general, the change propagation conducts a time continuous simulation to calculate the values for each parameter. Usually μ -ProPIAn instantiates workpieces according to the provided orders and simulates the material flow using parametrisations derived from the cause-effect networks. By diverting from μ -ProPIAn's proposed modelling conventions and subsuming all workpieces (ingredients) into a single element (compare section 3), each order can be interpreted as a distinct parametrisation of the same workpiece, thus neglecting the material flow aspect of the simulation. Moreover, as each order corresponds to a fixed, non-changing set of parameters across the process model, the change propagation will eventually reach a stable state for all parameters. To enable simulations for such use cases, in which the overall structure remains static but the parametrization changes consistently, the change propagation is extended to directly apply input parameters from the dataset, run the simulation, record each stable state as well as its targeted value (if available) and proceed to the next configuration. In general, this extension allows a simplified simulation of different parametrisations if the overall process (chain) remains static.

4.2 Simulation Scenarios and Results

To evaluate the energy efficiency, the customer behaviour is replicated using historical data, spanning approximately 640 days. First, the overall accuracy of the process model is evaluated. While the characteristic values provided in Table 1 show that each parameter is characterized quite well, the overall precision of the cause-effect network can differ due to an accumulation of errors. Thus, in a first study three simulation scenarios are used to compare the estimated consumption to the actual one recorded in the dataset. Therefore, each simulation focusses on a single type of press and simulates all orders, which were actually run by the specific press. In a second study, the overall energy efficiency of the different presses is assessed. Therefore, only a single type of press is used to manufacture all orders recorded in the dataset.

Table 2: Simulation Results

Scenario	Acc. Steam	Acc. Pressing	Energy Steam	Energy Pressing
Type 1	-0.14 %	0.77 %	100.00 %	100.00 %
Type 2	-0.36 %	0.03 %	98.03 %	78.05 %
Type 3	0.51 %	-1.28 %	98.07 %	62.65 %

Table 2 summarizes the simulation results for both studies. Thereby, the columns "Accuracy" (Acc. Steam and Acc. Pressing) depict the relative error comparing the sum of all predictions to the sum of all actual values for the energy consumption within the dataset. These values show that the cause-effect network's overall estimation error is relatively small (at max at 1.28 %). The columns "Energy" present the relative energy consumption for the second simulation study. Thereby, all orders

were simulated using only a press of the stated type. For the table, the most expensive press (Type 1) was selected as 100 % of energy consumption. Thus, lower percentages show that according to the simulation, other presses would only consume a portion of the energy. As a result, presses of type 3 would only consume about 63 % of the energy consumed by presses of type 1, calculated over all the orders within the dataset.

5 Discussion and Future Work

The article investigates the application of the modelling methodology μ -ProPIAn for the estimation of the energy consumption in the production of compound feed. Therefore, a process model is derived using a dataset of historical production runs. The resulting process model is used to simulate the energy consumption of three different types of presses. While the results in Table 2 show that presses of type 3 require only a fraction of the energy consumed by the other types of presses, the simulation study provided in this article only focusses on the energy consumption with respect to processing. In order to capture the financial impact of each type of press completely, additional factors have to be considered. Therefore, future work will aim to extend the model and the simulation, e.g. by considering processing times and capacities within the simulation or by evaluating investment and maintenance costs for the different types of presses. To enable an efficient simulation of scenarios, in which the overall process chain remains static but the composition of certain elements (i.e. raw materials) changes per order, the change propagation component was extended by means for efficiently managing and evaluating different configurations of the same static process chain. As depicted by this article, these changes enable an application of μ -ProPIAn to scenarios, in which more or less continuous streams of commodities are investigated. At this, the change propagation component is used to simulate these continuous streams, in contrast to the discrete-event simulation which is used in scenarios where different products or highly different components (e.g. in assemblies) are investigated.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support by the German Research Foundation (DFG) for the Subproject C4 ‘Simultaneous Engineering’ within the Collaborative Research Centre ‘Micro Cold Forming – Processes, Characterization, Optimization’ (SFB 747) as well as by the German Ministry for Economy Affairs and Energy (BMWi) for the project ‘Fu²-Expert’.

References

- Afazov, S.M.: Modelling and simulation of manufacturing process chains. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 1, pp. 70-77.
- Afazov, S.M.; Becker, A.A.; Hyde, T.H.: Development of a Finite Element Data Exchange System for chain simulation of manufacturing processes. *Advances in Engineering Software* 47 (2012), pp. 104-113.
- Baier, J.; Krieg, R.: Automatisierter Modellaufbau für Materialflusssimulationen in der Nutzfahrzeugproduktion. In: Markus Rabe (Ed.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Berlin: Fraunhofer IRB, 2008, pp. 51-60.

- Batarseh, O.; McGinnis, L.F.: System Modeling in SYSML and System Analysis in ARENA. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. (Eds.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, Berlin, Germany, 2012, pp. 1-12, DOI: 10.1109/WSC.2012.6464988.
- Cetinkaya, D.; Verbraeck, A.; Seck, M.D.: Applying a Model Driven Approach to Component Based Modeling and Simulation. In: Johansson, B.; Jain, S.; Montoya, T.J.; Hagan, J.; Yucsan, E. (Eds.): Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, Baltimore, USA, 2010, pp. 546-553.
- Denkena, B.; Rudzio, H.; Brandes, A.: Methodology for Dimensioning Technological Interfaces of Manufacturing Process Chains. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (2006) 1, pp. 497-500.
- Denkena, B.; Tönshoff, H.K.: Prozessauslegung und -integration in die Prozesskette. In: Denkena, B.; Tönshoff, H.K. (Hrsg.): *Spanen – Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer2011, pp. 339-362.
- DVT – Deutscher Verband Tiernahrung e.V.: Technologie der Mischfutterherstellung. Online, <https://www.dvtiernahrung.de/futter-fuetterung/herstellung.html>.
- Huang, Y.; Seck, M.; Verbraeck, A.: From Data to Simulation Models: Component-Based Model Generation with a Data-Driven Approach. In: Jain, S.; Creasey, R.R.; Himmelspach, J.; White, K.P. (Eds.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, Phoenix, USA, 2011, pp. 3724-3734.
- Kuo, Y.; Yang, T.; Parker, D.; Sung, C.-H.: Integration of customer and supplier flexibility in a make-to-order industry. *Industrial Management & Data Systems* 116 (2016) 2, pp. 213-235.
- Pietrzyk, M.; Madej, L.; Weglarczyk, S.: Tool for optimal design of manufacturing chain based on metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 57 (2008) 1, pp. 309-312.
- Rippel, D.; Lütjen, M.; Freitag, M.: Domain-Specific Modelling of Micro Manufacturing Processes for the Design of Alternative Process Chains. In: Proceedings of the 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation. Oulo, Finland, 2016, pp. 701-706. <http://eurosims16:conf16@conferences.computer.org/eurosims2016/papers/4119a701.pdf>
- Rippel, D.; Lütjen, M.; Freitag, M.: Local characterisation of variances for the planning and configuration of process chains in micro manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 43 (2017) 1, pp. 79–87.
- Rippel, D.; Lütjen, M.; Scholz-Reiter, B.: A Framework for the Quality-Oriented Design of Micro Manufacturing Process Chains. *Journal of Manufacturing Technology Management* 25 (2014a) 7.
- Rippel, D.; Moumi, E.; Lütjen, M.; Scholz-Reiter, B.; Kuhfuß, B.: Application of Stochastic Regression for the Configuration of a Micro Rotary Swaging Processes. *Mathematical Problems in Engineering* 2014(2014b), pp. 12. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/360862>
- Sabotin, I.; Valentincic, J.; Junkar, M.; Sluga, A.: Process planning system for micro-products. In: de Hoyos, A.; Kaminishi, K.; Duysters, G.: Proceedings of the 10th International Conference on Management of Innovative Technologies. Wuhan, China, 2009, pp. 8.
- Wenzel S: Modellbildung und Simulation in Produktion und Logistik - Stand und Perspektiven. In: Elst G (Hrsg.): Tagungsband zum ASIM-Treffen STS/GMMS 2009, DASS 2009. Stuttgart: Fraunhofer-IRB2009, pp. 7–16.

A Two-phase Genetic Algorithm to Solve a Multi-objective Problem for Complex Assembly Lines

Ein zweiphasiger genetischer Algorithmus zur Lösung eines Problems mit mehreren Zielen für komplexe Montagelinien

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

Abstract: Many real engineering problems involve multiple objectives, i.e., maximize factory performance and minimize production cost. In this paper, we focus on multi-objective optimization for complex assembly lines with workforce constraints. In these production systems, each order has its own production objectives, e.g., individual cycle time, tardiness and cost. Meanwhile, overall performance of the system, e.g., total cycle time, tardiness and cost, is the focus as well. A practical problem is to optimize individual objectives of different orders under conflicting situation, while keeping total objectives of the system in acceptable levels. To tackle this problem, we develop a multi-objective genetic algorithm combining with a two-phase altering objective functions procedure. Simulation experiments on a printing machine production model show its effectiveness of solving the problem in comparison with the peer algorithms.

1 Introduction

The research fields in which we operate are complex assembly lines for airplanes, printing machines, turbines and other heavy machines. In our past studies (Angelidis et al. 2013), a project network was used to represent this kind of production system. In the project network, each project that is composed of activities with precedence constraints denotes a production plan of product. This project network is highlighted by various modes of processing time and limited multi-skilled resources. This kind of production is defined as Multi-Mode Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem (MMRCMPSP) that is an extension of conventional flow shop scheduling. Many optimization strategies in literature concentrate on single objective optimization for the MMRCMPSP (Gen and Cheng 1997). As a matter of fact, multi-objective must be taken into consideration in real engineering situation, in particular, in the complex assembly lines. One characteristic of this project network is each project representing an order or a product has its own performance measure named individual objective, e.g., cycle time, tardiness and cost, because of the product customization. Due to fierce

competition for the limited resources, optimizing a particular objective for a project can result in unacceptable results to other projects. Therefore, it is necessary to search the compromise solutions among the conflicting objectives. Meanwhile, overall performance of the project network called total objective, e.g., total cycle time, total tardiness and total cost, is of interest as well. A practical problem arising here is, on one hand, we intend to optimize the individual objectives of different projects that are under conflicting situation. On the other hand, we expect that the total objectives of the project network are controlled in desired levels. Assuming there are three orders, and the cycle time of each is the objective. In the first front, there are three non-dominated solutions $A(90, 40, 50)$, $B(50, 90, 100)$ and $C(120, 80, 30)$. These three solutions are considered as good solutions as they are non-dominated with each other. However, when the total cycle time performance is expected to be lower than 200, solution $A(180)$ is the only eligible one because B is 240 and C is 230. It is of importance that providing good and eligible solutions as many as possible in a short time, which provides different types of options for the decision makers to make trade-off or choose solutions they prefer. Although there has been an increase in the multi-objective optimization using genetic algorithms (MOGA) in the last decades, the majority of the literature, for instance, random weight MOGA (Murata et al. 1996), two hybrid GAs (Cavaliere and Gaiardelli 1998), cellular MOGA (Murata et al. 2001), non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) (Deb et al. 2002) and Lorenz NSGA (L-NSGA) (Dugardin et al. 2010), is to deal with the overall performance of the project network, and there is still a lack of satisfactory solution to the problem we concern.

In this paper, we develop a MOGA consisting of elitist method and diverse population as other MOGAs do to solve MMRCMPSP for multi-objective optimization. In particular, based on this MOGA, we develop a two-phase altering objective functions procedure (two-phase MOGA) to improve the situation that simultaneous optimization for individual objectives may bring conflict to the desired total performance. As we already indicated, the problem we are facing is a large real engineering problem. Taking computational feasibility into consideration, instead of exploring the entire Pareto optimal set, we concentrate in searching non-dominated solutions as many as possible in a short time.

2 Multi-objective Genetic Algorithm

The MOGA comprises two parts which are multi-objective (fitness assignment) and genetic algorithm (key components listed in Table 2).

2.1 Multi-objective and Fitness Assignment

In this research, we target at three objectives minimization for the order (project) level and the production system (project network) level. Cycle time (the difference between release time and finish time), tardiness (the difference between due date and finish time) and cost (the cost for the usage of resources to perform activities) are considered as performance measures. For the order level, as the simulation model contains three orders (Section 3), three cases for individual objectives optimization are designed and displayed in Table 1. For the production system level, total cycle time (the sum of cycle time of all orders), total tardiness (the sum of tardiness of all orders) and total cost (the sum of cost of all orders) are three considered objectives. To evaluate the

fitness of a solution, based on Pareto dominance concept (Goldberg 1989) we apply the fast non-dominated sorting algorithm (Deb et al. 2002) which assigns a rank to a solution, rather actual objective function value.

Table 1: Three objectives optimization for order and production system

	Objective 1	Objective 2	Objective 3
Order Case 1	CycleTime _{order_1}	CycleTime _{order_2}	CycleTime _{order_3}
Case 2	Tardiness _{order_1}	Tardiness _{order_2}	Tardiness _{order_3}
Case 3	Cost _{order_1}	Cost _{order_2}	Cost _{order_3}
Production system	CycleTime _{production_system}	Tardiness _{production_system}	Cost _{production_system}

2.2 Genetic Algorithm

Table 2: Key components of the MOGA

	Method	Detail
Chromosome	Each chromosome is made of n+1 genes.	n is the number of activities of the project network, and the last gene (n+1) denotes the dispatching rule that generates priorities of the activities.
Population formation	A population consists of three parts 'X', 'Y' and 'Z' (Fig. 1) (Kühn et al. 2016): 'X': comes from the non-dominated solutions set that contains the solutions from the first front to the fifth front discovered by the GA so far (elitism method). 'Y': is generated from the previous population via selection, crossover and mutation. 'Z': is created randomly to maintain diversity of the population. It is described by one parameter 'random_create_rate'.	-For 'X': a parameter 'copy_rate_from_pareto' is used to represent percentage of the population copied from the non-dominated solutions. The MOGA applies tournament selection with a size of 2 to 'copy' the solutions from the non-dominated solutions set. If two solutions have different Pareto ranks, the one with smaller rank will be selected. Otherwise, the one with larger crowding distance (described in 'Solve genetic drift problem') will be selected, as shown in Algorithm 1.
Selection	Rank-based roulette wheel selection (Jadaan et al. 2005) is utilized to select solutions as parents to create offspring. To obtain the sorted solutions, we use two sorting procedures that consider Pareto rank as main sorting	Firstly, the solutions are sorted in ascending order based on their Pareto ranks. Then the solutions that have the same Pareto rank are sorted in descending order according to their crowding distances. Then, the mapping function that is used to

	and crowding distance as secondary sorting, as shown in Algorithm 2.	calculate the scaled ranks of solutions is shown in Equation (1).
Crossover	Employ parameterized uniform crossover to create offspring (Spears and DeJong 1991). After two solutions are selected as parents, at each gene a biased coin is tossed to determine which parent will pass the gene to the offspring.	It assumes that there are two parents A and B, and A has better fitness than B. A toss of head will choose the gene from parent A, and a toss of tail will select the gene from parent B. A parameter 'tail_rate' is used to represent the probability to toss a tail.
Solve genetic drift problem	The population tends to form relatively few clusters that prevent diverse populations, which is called genetic drift. Thus, the solutions located in densely populated areas should be penalized, which means their selection probabilities as parents should be reduced.	The first step is to calculate the Euclidean distance for every solution pair X and Y (Fonseca and Fleming 1993) (see Eq. 2). Then we calculate the crowding distance of solution X to other solutions in the population (see Eq. 3).
Solve optimization conflict between individual and total objectives	The idea is the evolving generations are divided into two parts. The objective functions are switched from total objectives to individual objectives as the GA evolves from the first part generations to the second part generations. This approach increases the probability of a solution, if whose total performance is better than the average value of total performance of all the first front solutions, to be selected as parents. In such a way, it is expected to create non-dominated solutions for the conflicting individual objectives. In the meantime, the total performance can be controlled in desired level.	In the first phase, we consider the total performance of the production system, i.e., total cycle time, total tardiness and total cost, as objectives for the first part generations. The main purpose is to set up a basic search direction in which the total performance can be controlled within the expected range in the second phase. As long as the GA evolves to the second part generations, the objectives are switched to individual performance of the orders. At first the non-dominated solutions generated from the first phase are re-ranked by the fast non-dominated sorting algorithm according to the considered individual objectives. Via Equation (4) and Algorithm 3, we assign total performance ranks to solutions and sort population.

Algorithm 1: Copy solutions from non-dominated solutions set

```

If solution(i)Pareto_rank is not equal to solution(j)Pareto_rank
    Select min (solution(i)Pareto_rank, solution(j)Pareto_rank)
Else select max (solution(i)crowding_distance, solution(j)crowding_distance)

```

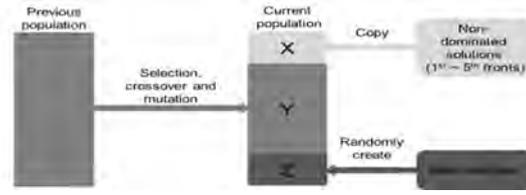


Figure 1: Population formation

Algorithm 2: Sort population by Pareto rank and crowding distance

Sort (sort (population) ascending by Pareto rank) descending by crowding distance

$$\text{ScaledRank}(pos) = 2 - 2 * (SP - 1) * \frac{pos-1}{n-1} \quad (1)$$

Where SP is the selective pressure ($1 < SP \leq 2$) that controls the bias between good and bad solutions, and it is considered as one parameter of the MOGA, pos is the position of the sorted solutions in the population, the fittest solution has $pos=1$ and the worst one has $pos=n$, n is the number of solutions in the population.

$$\text{EuclideanDistance}(x, y) = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2} \quad (2)$$

Where k is index of objective, f_k^{\min} and f_k^{\max} are the minimum and maximum value of the objective function $f(x)$ discovered so far, respectively.

$$\text{CrowdingDistance}(x, S) = \sum_{s=1}^S \text{EuclideanDistance}(x, s) \quad (3)$$

Where s is the index of solution in the population.

$$\text{Avg_of_first_front} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{solution}(i)_{\text{individual_objective}(j)}}{n} \quad (4)$$

Where i is the solution index in the first front, j is objective index, n is the number of solutions in the first front.

Algorithm 3: Assign total performance rank to solution, and sort population by Pareto Rank, total performance rank and crowding distance

If $\text{solution}(i)_{\text{total_performance}}$ is lower than the $\text{avg_of_first_front}$
 $\text{solution}(i)_{\text{total_performance_rank}} = 1$
Else $\text{solution}(i)_{\text{total_performance_rank}} = 2$
Sort (sort (sort (population) ascending by Pareto rank)
ascending by total performance rank) descending by crowding
distance

2.3 Procedures of MOGA and MOGA Combining with a Two-phase Altering Objective Functions

The procedure of the MOGA is described as follows:

- Step 1: Generate a random population.
- Step 2: Assign a Pareto rank to each solution according to the fast non-dominated sorting algorithm. Then update the non-dominated solutions set.
- Step 3: Using selection, crossover and mutation to create new solutions as follows:
 - Step 3.1: Calculate crowding distances of solutions by Equation (2) and (3).
 - Step 3.2: Sort the population according to Algorithm 2.
 - Step 3.3: Calculate the scaled ranks of solutions according to Equation (1).
 - Step 3.4: Apply rank-based roulette wheel selection method to select solutions as parents.
 - Step 3.5: Apply uniform crossover method to create new solutions.
 - Step 3.6: Apply a mutation operator (probability of 0.05) to the new generated solutions.
- Step 4: Based on the new generated solutions, form a new population via copying solutions from the non-dominated solutions set by Algorithm 1 and randomly creating new solutions.
- Step 5: If stopping criteria is met, terminate the search, otherwise go to Step 2.

The MOGA combining with a two-phase altering objective functions procedure (two-phase MOGA) is given as follows:

- Phase 1:
 - Phase 1.1: Set total objectives to the production system, and number of generations for the Phase 1 optimization. After that, generate a random population.
 - Phase 1.2: Run the MOGA mentioned above from Step 2 to Step 4.
 - Phase 1.3: If the specified generations are reached, go to Phase 2, otherwise go to Phase 1.2.
- Phase 2:
 - Phase 2.1: Set individual objectives to the orders, and the number of generations for the Phase 2 optimization. Then, resort the non-dominated solutions set according to the individual objectives by the fast non-dominated sorting algorithm.
 - Phase 2.2: Run the MOGA from Step 2 to Step 4 with a replacement of Step 3.2. New step 3.2: Calculate the 'avg_of_first_front' from the non-dominated solutions set by Equation (4); then assign the overall performance ranks to the solutions and sort the population according to Algorithm 3.
 - Phase 2.3: If the specified generations are reached, terminate the search, otherwise go to Phase 2.2.

3 Simulation Experiment and Results Analysis

The case study is based on a complex assembly line for the production of printing machines. The model structure is from our industrial partner, and the data is artificial for this test case. In this production system, there are 3 orders (3 project networks) with a total of 12 products. The processing times of activities vary between 30 to 480

minutes. Each activity has different execution modes that rely on the amount and the required skills of resources. Each order has its own release date and due date. Table 3 lists the basic information of the orders. There are 18 different types of resources divided into 16 types of workers, e.g., electrician and fitter, and 2 types of processing facilities, e.g., crane. The workers are classified into 8 types of internal workers and 8 types of sub-contracted workers. The number of each resource is 3. Each resource is associated with a cost unit that is used to calculate the production cost of usage for the resource on activities. The interested readers can find more details about modeling for this kind of complex assembly in (Angelidis et al. 2013).

In this study, we apply simulation based optimization concept which is widely used to obtain optimal solutions in large search space problem as the complex assembly line we focus on. A simulation based optimization platform (SBOP) which specializes in modeling, simulation and optimization is created (Angelidis et al. 2013). The optimization cycle of SBOP is shown in Figure 2. The first step is the transformation of the real system to the manufacturing model. The model describes all necessary production information as previously described. The optimizer in which our two-phase MOGA is implemented sets parameters and creates different simulation scenarios. After that, the simulation scenarios are simulated via the internal simulator and the simulation results are evaluated. This cycle is terminated when the target or the abort criteria is reached.

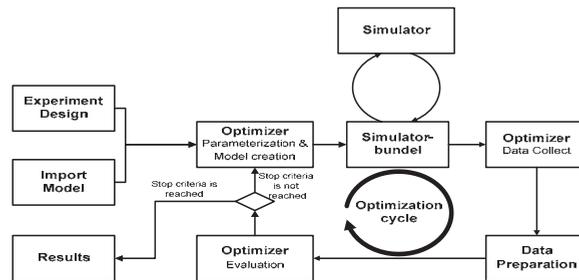


Figure 2: Simulation based optimization platform (SBOP)

As demonstrated in Table 2, 'copy_rate_from_pareto', 'random_create_rate', 'selective_pressure' and 'tail_rate' are considered as four parameters that potentially influence the search ability of MOGA. Before examining the performance of the two phase MOGA, we need to figure out the significance of these four parameters. Therefore, we carry out a design of experiment in which 3 levels of each parameter are defined and in total there are 81 combinations, as shown in Table 4. In this experiment, total cycle time, total tardiness and total cost are considered as three objectives. The population size is 50 and the evolution generations are 50, and the dispatching rule is FIFO (first in first out). Due to large amounts of data, the detailed results are not presented. Among this 82 parameter combinations, the one with 'copy_rate_from_pareto' (0.5), 'random_create_rate' (0.1), 'selective_pressure' (1.9), 'tail_rate' (0.5) is considered the best combination to produce the best result. This parameter combination is used for the following experiment.

Table 3: Basic information of orders

	Order 1			Order 2			Order 3					
Products	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Activities	31	28	129	91	29	105	25	165	128	62	73	70

Table 4: Design of experiment of the MOGA

	Level 1 (low)	Level 2 (middle)	Level 3 (high)
copy_rate_from_pareto	0.1	0.3	0.5
random_create_rate	0.1	0.2	0.3
selective_pressure	1.1	1.5	1.9
tail_rate	0.3	0.5	0.7

We continue the experiment targeting at individual cycle time optimization which is the case 1 in Table 1 (as a preliminary study, the individual tardiness and cost optimizations are not included in this paper, only the results of individual cycle time optimization will be presented). As the orders are the focus, we expect to explore diverse solutions regarding different behaviours based on different dispatching rules. Therefore, FIFO, earliest due date (EDD, due date oriented) and shortest processing time (SPT, processing time oriented) are considered as three dispatching rules that are encoded as a gene in the chromosome. The population size is 50 and the evolution generations are 50. In the first phase, we employ total objectives for the first 25 generations and individual objectives for the rest 25 generations for the second phase. The random weight MOGA and NSGA-II are the benchmark algorithms. Table 5 lists three performance measures. From previous four parameters configuration experiment, we obtain the minimum total cycle time – 5,116 hours when the total performance is considered as objective. If we determine a good solution whose total cycle time is less than 5,116 hours, for random weight MOGA and NSGA-II, 6 out of 34 (18 %) and 11 out of 29 (38 %) solutions fulfil this requirement, respectively. However, our two-phase MOGA achieves 21 out of 38 (55 %) solutions. Comparing to these two peer algorithms, our two-phase MOGA is able to obtain more solutions whose total performance is controlled to the targeted level.

Figure 3 demonstrates the ratio of non-dominated individuals (RNI) (Tan et al. 2002), which proves our two-phase MOGA is able to produce more non-dominated solutions than random weight MOGA and NSGA-II. RNI is defined as: $RNI(X) = nondom_indiv / P$, where $nondom_indiv$ is the number of non-dominated individuals (solutions) in population X and P is the size of population X . For instance, two sets of first front solutions from two-phase MOGA and NSGA-II are mixed. Then, the solutions which are non-dominated are selected to form a new population X . Finally, the RNI of two-phase MOGA is determined as the ratio of the number of non-dominated solutions (from two-phase MOGA) and the size of population X .

Table 5: Three performance measures comparison, individual cycle time

	Number of the first front solutions	Average value of total cycle time for all solutions in the first front (hours)	Number of the first front solutions whose total cycle time is less than 5116 hours
random weight MOGA	34	5542	6
NSGA-II	29	5386	11
Our two-phase MOGA	38	5105	21

random weight MOGA	40 %	60 %	35 %	65 %
	NSGA-II		42 %	58 %
	Our two-phase MOGA			

Figure 3: RNI comparison among three algorithms, individual cycle time

4 Conclusion

In this paper, we developed a MOGA to solve multi-objective optimization for complex assembly lines. Two kinds of performance measures, which are individual objectives for orders and total objectives for production system, were of interest. A printing machine production model was utilized to test the performance of our MOGA. Due to confliction, optimization for individual objectives may bring unacceptable levels to total objectives. Thus, we developed a two-phase procedure to alter objective functions for our MOGA to solve this problem. The simulation results proved that compared to the counterparts, the two-phase MOGA was able to produce more solutions whose total performance is superior to the targeted level.

Indeed, one feature of our MOGA is we can investigate its search ability by parameters configuration. We believe there will be room for improvement if we carry out an in-depth research for significance of parameters, which is considered as a possibility of future research. Moreover, the two-phase altering objective functions procedure can be adapted and applied to other problem domains, as long as both individual performance and total performance are the focus. Also, we are interested in testing different sizes of problems considering other performance as objective like resource utilization, and applying more dispatching rules.

Acknowledgement

The presented work is a result of the research project “Simulationsbasierte dynamische Heuristik zur verteilten Optimierung komplexer Mehrziel-Multiprojekt-Multiressourcen-Produktionsprozesse” (Funded by the Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG), Duration 04/2013-03/2017).

References

- Angelidis, E.; Bohn, D.; Rose, O.: A simulation tool for complex assembly lines with multi-skilled resources. In: Pasupathy, R.; Kim, S.-H.; Tolk, A.; Hill, R.; Kuhl, M. E. (Eds.): Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, D.C. (USA), 2013, S. 2577-2586.
- Cavalieri, S.; Gaiardelli, P.: Hybrid genetic algorithms for a multiple-objective scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing* 9 (1998), pp. 361-367.
- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGAI. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2002), pp. 182-197.
- Dugardin, F.; Yalaoui, F.; Amodeo, L.: New Multi-objective method to solve reentrant hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 203 (2010), pp. 22-31.
- Fonseca, C.M.; Fleming, P.J.: Multiobjective genetic algorithm. In: IEE Colloquium on Genetic Algorithms for Control Systems Engineering, London (UK), 1993, pp. 1-6.
- Gen, M.; Cheng, R.: Genetic algorithm and engineering design. New York: John Wiley and Sons 1997.
- Jadaan, O.A.; Rajamani, L.; Rao, C.R.: Improved selection operator for GA. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* 4 (2008), pp. 269-277.
- Kühn, M.; Zahid, T.; Völker, M.; Zhou, Z.; Rose, O.: Investigation of genetic operators and priority heuristics for simulation based optimization of multi-mode resource constrained multi-project scheduling problems (MMRCMPSP). In: Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M.; Rose, O. (Eds): Proceedings of European Council for Modelling and Simulation, Regensburg (Germany), 2016.
- Murata, T.; Ishibuchi, H.; Tanaka, H.: Multi-objective genetic algorithm and its applications to flowshop scheduling. *Computers & Industrial Engineering* 4 (1996), pp. 957-968.
- Murata, T.; Ishibuchi, H.; Gen, M.: Specification of genetic search directions in cellular multiobjective genetic algorithms. In: Zitzler, E.; Deb, K.; Thiele, L.; Coello Coello, C.A.; Corne, D. (Eds.) First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Springer, Lecture Notes in Computer Science Zurich (Switzerland), 2001, pp. 82-95.
- Spears, W.M.; Dejong, K.A.: On the virtues of parameterized uniform crossover. In: Belew, R.K.; Booker, L.B. (Eds.): Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, San Diego (USA), 1991, pp. 230-236.
- Tan, K.C.; Lee, T.H.; Khor, E.F.: Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: performance assessments and comparisons. *Artificial Intelligence Review* 17 (2002), pp. 253-290.

Design of Project-oriented Calculation Models for Job Priorities by Using a Customized Genetic Algorithm

Entwicklung projektspezifischer Berechnungsmodelle für Auftragsprioritäten mit einem Genetischen Algorithmus

Thorsten Schmidt, Mathias Kühn, Paul Richard Genßler, TU Dresden, Dresden (Germany), thorsten.schmidt@tu-dresden.de, mathias.kuehn@tu-dresden.de, paul.genssler@tu-dresden.de

Abstract: In this paper, the resource-constrained multi-project scheduling problem (RCMPSP) is solved by using project-oriented calculation models for job priorities. Many studies show that effectiveness of simple priority rules depends on the problem class and type of instance. Better results can be achieved with individually designed calculation models for job priorities such as the approach for weighted sum of priority rules used in this work. The focus of the paper is an extension of this approach where each weight is computed project specifically by a customized genetic algorithm (GA) using the theory of simulation based optimization. The algorithm is implemented in a specially developed python based scheduling and optimization framework. For evaluation, we compared our concept to simple priority rules and other heuristics over selected benchmark sets with the objective of total makespan. Results show a similar or better performance and robustness on different models.

1 Introduction

Simple Priority Rules (SPR), e.g. Earliest Due Date (EDD) or First-In-First-Out (FIFO), are often used for scheduling. Manufacturers who produce every time the same or similar products, SPR can be quite effective (Kaban et al. 2012; Pinedo 2009). For decision-making in complex and flexible production environments, e.g. with frequently changing production programs, SPR provide inefficient results (Tay and Ho 2008; Pinedo 2009). With such observations it can be concluded that the performance of SPRs greatly varies with the increase in problem complexity and instance type. Due to the global trend towards customization resulting in higher production requirements and thus increasing complexity, alternative methods for solving the scheduling problem are becoming more important to guarantee efficiency.

In this paper, we focus on solving resource-constrained multi-project scheduling problems (RCMPSP) with an extension of the approach of weighted sum of priority rules. This approach can be assigned to the category of dynamic priority rules in which the schedule is determined by updating the job priority. The job priority is calculated by combining different priority rules normalized with the weighted sum approach. In general, the weight sets for calculation of the priority are identically for each job. In our extension, we generate an individual weight set for each project by using a customized genetic algorithm (GA). We have chosen this approach because of high practical relevance and better performance for job floor control in comparison with other approaches such as genetic programming (Kuczapski et al. 2010). For the problem class of RCMPSP exists a benchmark library (Homberger 2017), which allows us to verify our approach.

2 Problem Definition: Resource-constrained Multi-project Scheduling Problem (RCMPSP)

The considered extension of the resource-constrained project scheduling problem (RCPSp) (Brucker and Knust 2012) to the resource-constrained multi-project scheduling problem (RCMPSP) can be stated as follows (Homberger 2007):

The given set of information includes a time horizon $[0, T]$, a set of I projects numbered from 1 to m which have to be planned simultaneously and a set of J_i of non-preemptable jobs for each project $I \in I$. The tasks in J_i are numbered from $n_{i-1}+1$ to n_i , with $n_0 = 0$ and where $n_{i-1} + 1$ and n_i are dummy jobs. The dummy jobs need no resources and have processing time zero. Furthermore, precedence constraints are defined between some jobs. They are given by a set A_i of finish-start precedence relations between these activities. A release date rd_i for each project $I \in I$ is given, which describes the earliest time when project I can start. Project I arrives at $rd_i = 0$, while the others arrives at $rd_i \geq 0$. Furthermore, a set L_i of local resources for each project $I \in I$ is given. In addition, a set G of global renewable resources ($|G| \geq 1$) is given, which is shared by all projects. Job j must be processed for p_j time units. A constant capacity amount of resource $l_i \in L_i$ units, denoted by $rl_i \in IM$ and/or a constant capacity amount of resource $g_o \in G$ units, denoted by $rg_o \in IM$ is occupied by the job j , $1 \leq j \leq n_m$, during this time period, where $0 \leq rl_i \leq al_i$; al_i denotes the constant amount of capacity units of $l_i \in L_i$ available in each time period $t = 0, \dots, T$ and $0 \leq rg_o \leq ag_o$; ag_o denotes the constant amount of capacity units of $g_o \in G$ available in each time period $t = 0, \dots, T$. The vector $S_i(f_{n_{i-1}+1}, \dots, f_{n_i})$ is referred to the finish times of all jobs in J_i and describes a schedule of project i . S_i is called feasible if all resource and precedence constraints are fulfilled. The start time of the first dummy job is also the start time of the project and is denoted as $s_{n_{i-1}+1}$. The finish time f_{n_i} of the last dummy job is also the finish time of the project. Information asymmetry is not assumed.

We chose the objective to minimize the total makespan (TMS) (Eq. 1):

$$TMS = \max\{f_{n_i}\} - \min\{s_{n_{i-1}+1}\} \quad (1)$$

where, f_{n_i} is the finish time of a job and $s_{n_{i-1}+1}$ is the arrival time of a job in the system.

3 State of the Art

Whenever multiple jobs are queued, the jobs must be prioritized in order to assign limited resources. To determine the job with the highest priority, dispatching rules are often used. In general, priority rules can be mainly classified into two types (Panwalkar and Iskander 1977; Tay and Ho 2008): Simple Priority Rules (SPR) and Composite Priority Rules (CPR).

SPRs are characterized by the use of one job attribute for sequencing. Based on the job attributes, SPRs can be divided into different classes (Bloech 2014). With regard to the temporal influence on a priority, SPRs can be characterized into static and dynamic rules. While for static rules (e.g. SPT-shortest processing time) the priority in a queue does not change, for dynamic rules (CR-critical ratio) the priority is recalculated whenever the capacity of a resource changes. A further division is based on the required information requirements. Local rules (e.g. EDD-earliest due date) use only information on the resource in question. Global rules (e.g. WINQ-least work in next queue) use information from the entire system. There are also classifications according to the mode of action of SPRs. Research on SPRs is being published on regular basis, which is why these rules are listed in the state of the art with their simplicity and practical relevance. However, no rule can be categorized as the dominating one. To balance this disadvantage, many approaches were developed which combine good characteristics of SPR-the so called CPR. The design process can be done in different ways (see review Branke et al. 2016) . A popular way is the generating of CPR with genetic programming (GP). Tay and Ho (2008) introduced a GP-Framework for solving the flexible job shop problem. They used seven different terminals (e.g. job attribute due date) and five different functions. Results show, that the CPR outperforms the SPR. With this approach, the rule length and thus, rule computation time could be very long. Hildebrandt and Freitag (2015) took up this point and investigate the generation of a practical rule length dependent on the objective. They concluded that results of short rule lengths are not significant worse than results of long rule lengths. However, a general conclusion which rule length fits to acceptable results is impossible without an exploration of the solution space. This leads to a high effort with constantly changing products. Another popular way is the linear combination of SPR with computed weights. Ma et al. (2012) calculate the weights over a matrix consisting of the results for different objective functions when applying a priority rule. With application of this calculation model, the result is exactly one weight set. So this procedure is not an optimization and full potential is not exploited. An interesting approach for evolutionary computation of weighted priority rules was proposed by Kuczapski et al. (2010). They used a customized genetic algorithm to compute weights for generating near optimal initial populations. An individual of a population represents a list of priorities for each job which are assigned in advanced. Hence, with this method only static job attributes can be used (e.g. not dynamic attributes like waiting time or arrival time in a queue) and dynamic relationships between different projects cannot be considered. The results of the propose algorithm where compared to GP results and show significant better performance on objective values and computation time. Ingimundardottir and Runarsson (2016) are also using a genetic algorithm to compute the weights but calculate the job priority during the simulation. The results are promising, but it is computationally expensive. They are also using only a non-project specific calculation model. Attributes like waiting time are not considered.

We decided to extend the weighted sum approach because of the practicability (easy to understand priority rules) and also because of the promising results.

Our literature research revealed that there are no applications of the weighted sum approach for the RCMPSP where the calculation models are generated individually for each project. There is also potential of using more job attributes to get more benefits of the SPR (e.g. waiting time). Furthermore, for applying this approach, it is necessary to reduce runtime significantly. We address this requirement by developing a functional and slim simulation and optimization framework.

4 Solution Approach: Project-oriented Calculation Models for Job Priorities

4.1 Chromosome Representation

Each project has individual weights according to the job attributes for calculating the job priority. The weights represent a chromosome (Eq. 2; Eq. 3).

$$PIW_i = \sum_{e=1}^E pw_{ie} \quad (2)$$

$$\sum_{e=1}^E pw_{ie} = 1, pw_{ie} \in R \quad (3)$$

where PIW_i is the project individual weight set of project i ($i=1 \dots I$); E is the number of used job attributes PR_e and pw_{ie} is the project individual weight with a real number in the interval of $[0, 1]$.

Each individual consists of chromosomes according to the number of projects I . A single chromosome consists of genes according to the number of job attributes PR_e . A gene represents the individual weight pw_{ie} (Fig. 1).

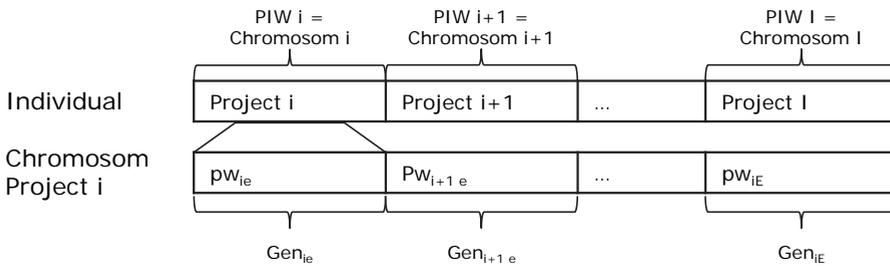


Figure 1: Chromosome representation

In this investigation, we use ten different job attributes PR_e (Tab. 1).

Table 1: Job attributes (PR_e) for weighted sum approach

Symbol	Ex-pression	Description
RR	rl_j / rg_j	Amount of required local / global resources of job j of project i
PT	p_j	Processing time of job j of project i
WT	w_j	Waiting time of job j of project i
IS	is_j	Amount of immediate successors of job j of project i
PJ	p_j	Amount of parallel jobs j in work in process of project i
PTS	$p_{(j+1)_i}$	Processing time of successor of job j of project i
DD	f_{n_i}	End time of project i
RD	$s_{n_{i-1}+1}$	Start time of project i
LST	lst_j	Latest start time of job j of project i
RT	rt_j	Remaining time successors job j on critical path of project i

4.2 Selection, Crossover, Mutation and Forming a Population

To select individuals for crossover and copying, we use a tournament-like system (Blickle and Thiele 1996).

The implementation of the GA operator crossover is based on the standard uniform crossover (Kora and Yadlapalli 2017).

Each weight of a weight set can be mutated. The mutation of a weight is dependent on the rate of mutation, e.g. a mutation rate of 0.8 means that the probability for a mutation of a single weight is 80 %. If a gene for mutation has been selected, a number between 0 and 1 is set. After mutation, the total sum of a weight set will be adjusted to 1 (Fig. 2).

$$\text{Child I} = \{ \text{Parent I Project } i, \text{Parent II Project } i+1, \dots \}$$



Figure 2: Mutation

A population is based on three parts: copied individuals, randomly created individuals and individuals generated by crossover and mutation. The size of each part can be defined by the user.

4.3 Calculation of Job Priorities

For each job in a queue, the individual job priority according to the project individual weight set and job attribute is being computed. After computing the priority, the jobs are sorted descending by their priority. The job with the highest priority will be performed next. The project individual calculation for the job priority in general is as follows (Eq. 4):

$$IP(j_i) = \sum_{e=1}^E pw_{ie} * \frac{PR_e(j_i)}{PR_{e,max}} \tag{4}$$

where $IP(j_i)$ is the individual priority of job j of project i . $PR_e(j_i)$ is the job attribute of job j of project i , pw_{ie} is the project individual weight of $PR_e(j_i)$ and $PR_{e,max}$ is the attribute's maximum value of all jobs j in the queue.

4.4 Simple Example

Considered are $i = 2$ projects with $j = 7$ activities each, $G = 1$ global resource with a capacity $ag = 4$ resource units (RU). The due date for project 1 is $DD = 13$ time units (TU) and for project 2 $DD = 15$ TU. The objective is to minimize TMS (Eq. 1). The following network is given (Fig. 3):

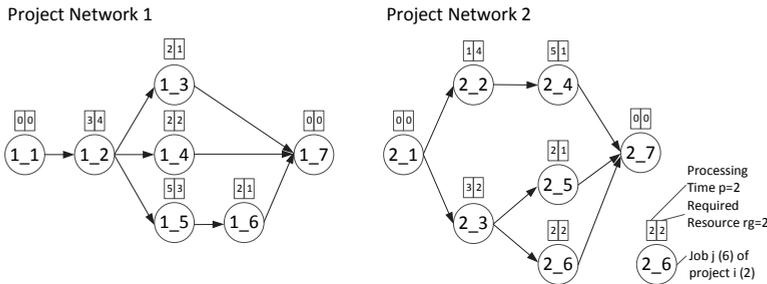


Figure 3: Activity-on-node network for the example

In the example, we use two job attributes: required global resource rg and processing time p . From Equation 4 results the following problem-specific equation (Eq. 5).

$$IP(j_i) = pw_{i,rg} * \frac{rg(j_i)}{rg_{max}} + pw_{i,p} * \frac{p(j_i)}{p_{max}} \tag{5}$$

The weight sets are calculated with the proposed GA. For the best value of TMS, following weight sets were applied (Tab. 2):

Table 2: Weight sets for best TMS

	$pw_{i,rg}$	$pw_{i,p}$
PIW ₁ Project 1	0.9	0.1
PIW ₂ Project 2	0.8	0.2

The scheduler operates with a parallel generation scheme. Priorities are calculated during the scheduling. The job with the highest priority is performed first. Using the proposed approach and the specified weight set (Tab. 2), the following schedule results (Tab. 3)

Table 3: Simulation log (extract)

T	ag	Executable Jobs and	Calculated	Priorities	Executed Job
[TU]	[RU]	[Project_Job:Priority]			
...
0	4	1_2: 1; 2_2: 0.86; 2_3: 0.6			1_2
3	4	1_3: 0.26; 1_4: 0.49; 1_5: 0.77; 2_2: 0.84 ; 2_3: 0.52			2_2
4	4	1_3: 0.34; 1_4: 0.64; 1_5: 1; 2_3: 0.65; 2_4: 0.46			1_5
4	1	1_3: 0.94; 2_4: 1			2_4
...

For the highlighted row (Tab. 3), the calculation of the priorities is demonstrated in the following equations (Eq. 6):

$$IP(1_3) = 0.9 * \frac{1 RU}{1 RU} + 0.1 * \frac{2 TU}{5 TU} = 0.94$$

$$IP(2_4) = 0.8 * \frac{1 RU}{1 RU} + 0.2 * \frac{5 TU}{5 TU} = 1$$
(6)

The complete result for solving the considered problem with the approach and a comparison to SPR (EDD and SPT) is shown in the following Gantt-Charts (Fig. 4):

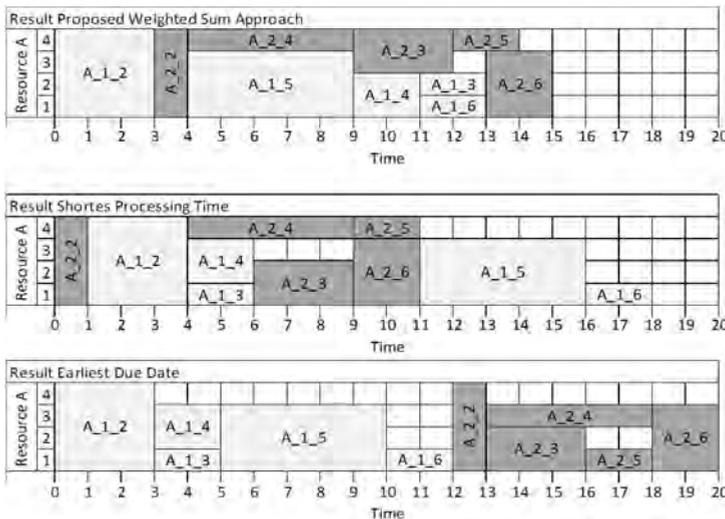


Figure 4: Gantt-chart of the simple example

5 Experiments and Results

5.1 PyScOp-Framework

For proofing the proposed concept, we developed a customized lean scientific scheduling and optimization framework named PyScOp (Python-based Scheduling and Optimization Framework, Kühn et al. 2017) which is based on the programming language Python (Python Software Foundation 2017). The basic function of the platform is as follows (Fig. 5):

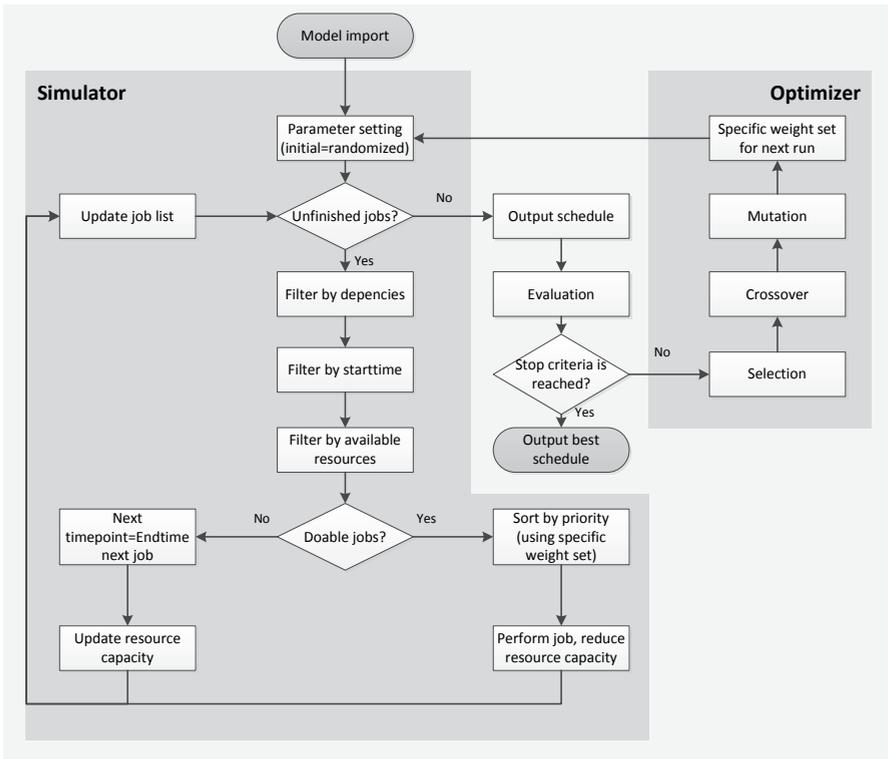


Figure 5: Simulation-based optimization with proposed PyScOp-Framework

5.2 Benchmark Tests

The performance of the proposed algorithm was benchmarked using the famous MPSPLIB (Homberger 2017) and compared to SPRs and the library's best results (Tab. 4). The objective of each optimization run was to minimize the total makespan (Eq. 1).

For the experiments we used the following GA settings:

Maximum population size: 100, maximum generation size: 500, copy rate 0.1, random rate 0.1, mutation rate 0.6, crossover rate 0.6 and tournament rate 0.05. If the objective value does not improve after 50 generations, the algorithm stops.

Table 4: Problem character and results

Problem	mp_j30_a10_nr1	mp_j30_a10_nr3	mp_j30_a10_nr5	mp_j90_a10_nr1	mp_j90_a10_nr3	mp_j90_a10_nr5	mp_j120_a10_nr2	mp_j120_a10_nr5	mp_j120_a20_nr3	mp_j120_a20_nr4	mpj_120_a10_nr5_AC1	mpj_120_a10_nr5_AC2	mp_j120_a20_nr5_AC1	mp_j120_a20_nr5_AC9
FIFO	196	266	222	228	249	270	307	540	338	297	806	432	413	342
EDD	196	284	209	228	240	282	316	540	275	232	839	440	433	346
SPT	204	263	218	187	246	320	307	551	290	220	823	417	406	328
CR	201	265	220	177	245	248	277	547	280	228	831	422	441	338
MSLK	191	256	192	166	226	270	287	490	280	212	773	384	384	302
MWRK	205	261	211	226	281	309	350	511	303	229	817	424	421	362
Best LIB*	188	243	186	158	213	230	248	481	235	203	763	378	380	301
Our WS**	187	242	184	157	213	227	242	480	230	201	760	376	374	295

*Best solution of MPSPLIB as of 05.05.2017 (Homburger 2017)

**Result of proposed weighted sum approach is submitted on MPSPLIB (Homburger 2017).

6 Conclusions and Further Research

In this paper, we presented an approach for calculating project individual job priorities for solving the MRCMPSP by using a customized genetic algorithm. For verifying the effectiveness, we developed a python-based scheduling framework and evaluated it with the famous benchmark library MPSPLIB. Our results are equal or better to existing solutions with respect to our chosen objective function TMS. However, there is much more research potential.

Our next step is the implementation of a multi-objective algorithm (e.g. a non-dominated sorting algorithm such as NSGA-III (Deb and Jain 2014)) to investigate the behaviour of differentiated objectives. Further, we will investigate the stochastic influence of process time fluctuation and want to answer the question, if it is possible to generate robust calculation models.

Acknowledgement

The research was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), "Simulationsbasierte dynamische Heuristik zur verteilten Optimierung komplexer Mehrziel-Multiprojekt-Multiressourcen-Produktionsprozesse" (SCHM 2689/5-1 RO 2126/3-1).

References

- Blickle, T.; Thiele, L.: A Comparison of Selection Schemes Used in Evolutionary Algorithms. *Evolutionary Computation* 4 (1996) 4, pp. 361–394.
- Bloech, J.: Einführung in die Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer 2014.
- Branke, J.; Nguyen, S.; Pickardt, C.W.; Zhang, M.: Automated Design of Production Scheduling Heuristics. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 20 (2016) 1, pp. 110–124.
- Brucker, P.; Knust, S.: Complex scheduling. New York: Springer 2012.
- Deb, K.; Jain, H.: An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 18 (2014) 4, pp. 577–601.
- Hildebrandt, T.; Freitag, M.: Bessere Prioritätsregeln für komplexe Produktionssysteme mittels multi-kriterieller simulationsbasierter Optimierung. In: Rabe, M.; Clausen, U. (eds.): 16. ASIM-Fachtagung Simulation in Production and Logistics 2015, Dortmund: Fraunhofer Verlag, pp. 309–318.
- Homberger, J.: A multi-agent system for the decentralized resource-constrained multi-project scheduling problem. *International Transactions in Operational Research* 14 (2007) 6, pp. 565–589.
- Homberger, J.: MPSPLIB. With cooperation of Christian Tausch und Christian Wiedemann. Hg. v. Hochschule für Technik Stuttgart. Online available www.mpsplib.com. Last access 07.07.2017.
- Ingimundardottir, H.; Runarsson, T.P.: Evolutionary Learning of Linear Composite Dispatching Rules for Scheduling. In: Merelo, J.J.; Rosa, A.; Cadenas, J.M.; Dourado, A.; Madani, K.; Filipe, J. (eds.): *Computational Intelligence*. Cham: Springer International Publishing 2016, pp. 49–62.
- Kaban, A.K.; Othman, Z.; Rohmah, D.S.: Comparison of dispatching rules in job-shop scheduling problem using simulation. *International Journal of Simulation Modelling* 11 (2012) 3, pp. 129–140.
- Kora, P.; Yadlapalli, P.: Crossover Operators in Genetic Algorithms. *International Journal of Computer Applications* 162 (2017) 10, pp. 34–36.
- Kuczapski, A.M.; Micea, M.V.; Maniu, L.A.; Cretu, V.I., 2010: Efficient generation of near optimal initial populations to enhance genetic algorithms for job-shop scheduling. *Information Technology and Control* 39 (2010) 1, pp. 32–37.
- Kühn, M.; Schmidt, T.; Genßler, P., 2017: PyScOp: TU Dresden, Professur für Technische Logistik. <https://tlscm.mw.tu-dresden.de/scm/git/PyScOp>. Last access 09.07.2017
- Ma, L.M.; Li, J.Y.; Xu, W.S.; Kong, L.J.: Multi-Objective Scheduling Based on Weighted Combination of Heuristic Rules and the Simulation Method. *Advanced Materials Research* 424-425 (2012), pp. 1132–1138.
- Panwalkar, S.S.; Iskander, W.: A Survey of Scheduling Rules. *Operations Research* 25 (1977) 1, pp. 45–61.
- Pinedo, M.L.: Planning and scheduling in manufacturing and services. Dordrecht: Springer 2009.
- Python Software Foundation, 2017: Python. www.python.org. Last access 10.02.2017.
- 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.

Decision Support for Logistics Networks in Materials Trading Using a Simheuristic Framework and User-generated Action Types

Entscheidungsunterstützung für Logistiknetzwerke des Werkstoffhandels unter Einsatz eines Simheuristic Framework und benutzergenerierten Maßnahmentypen

Markus Rabe, Felix Dross, Dominik Schmitt, Majsa Ammouriova, TU Dortmund,
Dortmund (Germany), markus.rabe@tu-dortmund.de, felix.dross@tu-dortmund.de,
dominik.schmitt@tu-dortmund.de, majsa.ammouriova@tu-dortmund.de

Carola Ipsen, thyssenkrupp Materials Services GmbH, Essen (Germany),
carola.ipсен@thyssenkrupp.com

Abstract: This paper presents recent extensions made to a previously presented decision support system (DSS) for logistics networks in materials trading. The system uses a simheuristic framework to compute integrated action sets from actions that could possibly be realized in a logistics network. In order to increase the usability and flexibility of the DSS, a concept for extending the system with user-generated action types is presented in this paper. Furthermore, different implementations of the systems' heuristic unit have been tested. In this respect, the paper presents promising results and gives an outlook regarding further research.

1 Introduction

Logistics networks are complex systems that can be very hard to manage. With the aim to develop methods and systems that provide decision support for logistics networks, the authors are cooperating with an international materials trading company. The company operates a large, complex and heterogeneous logistics network with over 100 warehouses and an inventory of around 150,000 items on permanent stock. The company uses a data warehouse to measure different key performance indicators (KPI) for different aspects of the logistics network, e.g., to measure inventory productivity or the transportation utilization. Furthermore, different KPI monitoring systems (KPIMS) are used to help the decision makers cope with the complexity of the network (Dross and Rabe 2014). Each KPIMS constantly monitors one KPI and sends an individually composed KPI alert to a responsible decision maker, if the KPI leaves certain predefined corridors. An alert generally consists of two parts: the performance measure that caused the KPI to

deteriorate and a set of possible actions that could be performed by the addressed decision maker in order to improve the KPI. The different KPIMS are not connected to each other and each alert is sent to the decision makers of the company independently. As a result, the actions suggested by one KPIMS could improve its own KPI while possibly worsen one or more other KPIs. Therefore, the initial setup could lead to a decline of the overall network performance instead of an improvement (Dross and Rabe 2014; Rabe and Dross 2016). The overall research goal is to develop a decision support system (DSS) for logistics networks that can automatically find action sets that have the potential to improve the overall network situation regarding all KPIs, called integrated action sets (Dross and Rabe 2014).

In order to solve the problem described above, Dross and Rabe (2014) proposed to develop a simheuristic framework as the basis for a decision support system (DSS). A simheuristic approach combines a simulation model with a meta-heuristic (Juan and Rabe 2013). In recent years, a prototype, realizing the concept, has been continuously developed (Rabe and Dross 2015; Rabe and Dross 2016; Rabe et al. 2017). For the DSS, action types define which types of actions can be applied to the simulation model. Therefore, action types influence the search space for the meta-heuristic. In order to extend the functionality of the DSS, a concept to integrate user-generated action types was necessary. This concept and its implications on the DSS components are presented in this paper.

The paper is structured as follows: Section 2 gives an overview of related work. Section 3 introduces the development of a modelling language as the prerequisite for the integration of new action types. Section 4 describes the usage concept for integrating new action types into the system. Section 5 gives an outlook on expected implications on the heuristic unit. Section 6 presents the authors' current approaches for the heuristic unit. Section 7 closes the paper with a conclusion and an outlook.

2 Related Work

This section presents related work with an emphasis on DSS for logistics networks and supply chain simulation approaches. Furthermore, the architecture of the DSS is presented.

2.1 Decision Support for Logistics Networks

Logistics assistance systems (LAS) have been described as systems providing decision support for logistics networks by Blutner et al. (2007) and Kuhn et al. (2008). LAS are systems which assist planners to quickly identify critical situations and objectively evaluate consequences of possible decision alternatives. Deiseroth et al. (2008) and Bockholt et al. (2011) describe LAS for planning and decision support in supply chains, especially in the automotive sector. Liebler et al. (2013) present a simulation-based approach for gaining insight in global supply networks and explain its use for LAS. The terms LAS and DSS for logistics networks are used synonymously in the literature. In general, DSS is a widely accepted term in the international literature (Shim et al. 2002; Kengpol 2008). For this research, the authors decided to consistently use the term DSS, although the system could also be referred to as a LAS.

2.2 Supply Chain Simulation and Simulation-based Optimization

In order to support the research described in this paper, a corresponding prototype has been developed using the supply chain simulation tool SimChain (SimPlan AG 2017). The concept of SimChain has been described by Gutschwager and Aliche (2004). It is a supply chain simulation tool especially suitable for the analysis of distribution and production networks. SimChain is a data-driven simulation tool. It consists of two components: a set of generic building blocks for a logistics network simulation in Siemens Plant Simulation and a corresponding data model stored in a MySQL database. The data model holds the complete parameterization for the generic building blocks, including the structure of the network. The actual simulation model is dynamically instantiated from the data model at run time. Therefore, a possible action can be applied as a change to the data model, and is then reflected in the instantiated simulation model. The approach, therefore, offers a data-level interface to the simulation model. Another simulation tool with a comparable approach, but targeted more towards distribution networks in the automotive sector, is OTD-NET (Fraunhofer IML 2017). SimChain has been chosen because the authors had good experiences using the software in the E-SAVE project in a comparable application (Rabe et al. 2013).

A good overview of possible combinations of simulation and optimization techniques is provided by März et al. (2011). In case a simulation is used as the evaluation function of an optimization algorithm, this is defined as a "Category D" approach by the German VDI (VDI 3633 Part 12 2016). Juan and Rabe (2013) have proposed to use the term *simheuristics* when a meta-heuristic is combined with a simulation model to solve stochastic optimization problems. Therefore, this term is also consistently used in this paper. Previous researches have proposed to solve combinatorial optimization problems using genetic algorithms or evolutionary algorithms (EA) (Osaba et al. 2014; Zhang et al. 2015; Cabrera et al. 2016). The EA approach is also the one followed in the research presented here.

2.3 Decision Support System for Logistics Networks with a Simheuristic Framework

The *simheuristic* framework approach for the DSS has already been presented in Dross and Rabe (2014), Rabe and Dross (2015), Rabe et al. (2015), Rabe and Dross (2016) and Rabe et al. (2017). Therefore, this paper only provides a brief overview of the system. An illustration of the system architecture is given in Figure 1.

A model builder software is used to automatically transform the raw data drawn from the data warehouse into a simulation data model. Once the simulation data model has been loaded into the database of the simulation tool, the simulation can be executed, as described in section 2.2. A shadowed data warehouse is used to gather the simulation output data and calculate the relevant KPIs. A credible measurability of the data warehouse KPIs on the simulation output data is ensured by a specifically developed procedure model (Rabe et al. 2015). Once the heuristic unit has registered the initial simulation results, it can experiment by applying actions to the simulation database. An action is resolved into changes by an execution engine. After an action is applied, a new simulation can be instantiated, the simulation can be run and the potential KPI effects of an action can be evaluated by the heuristic unit.

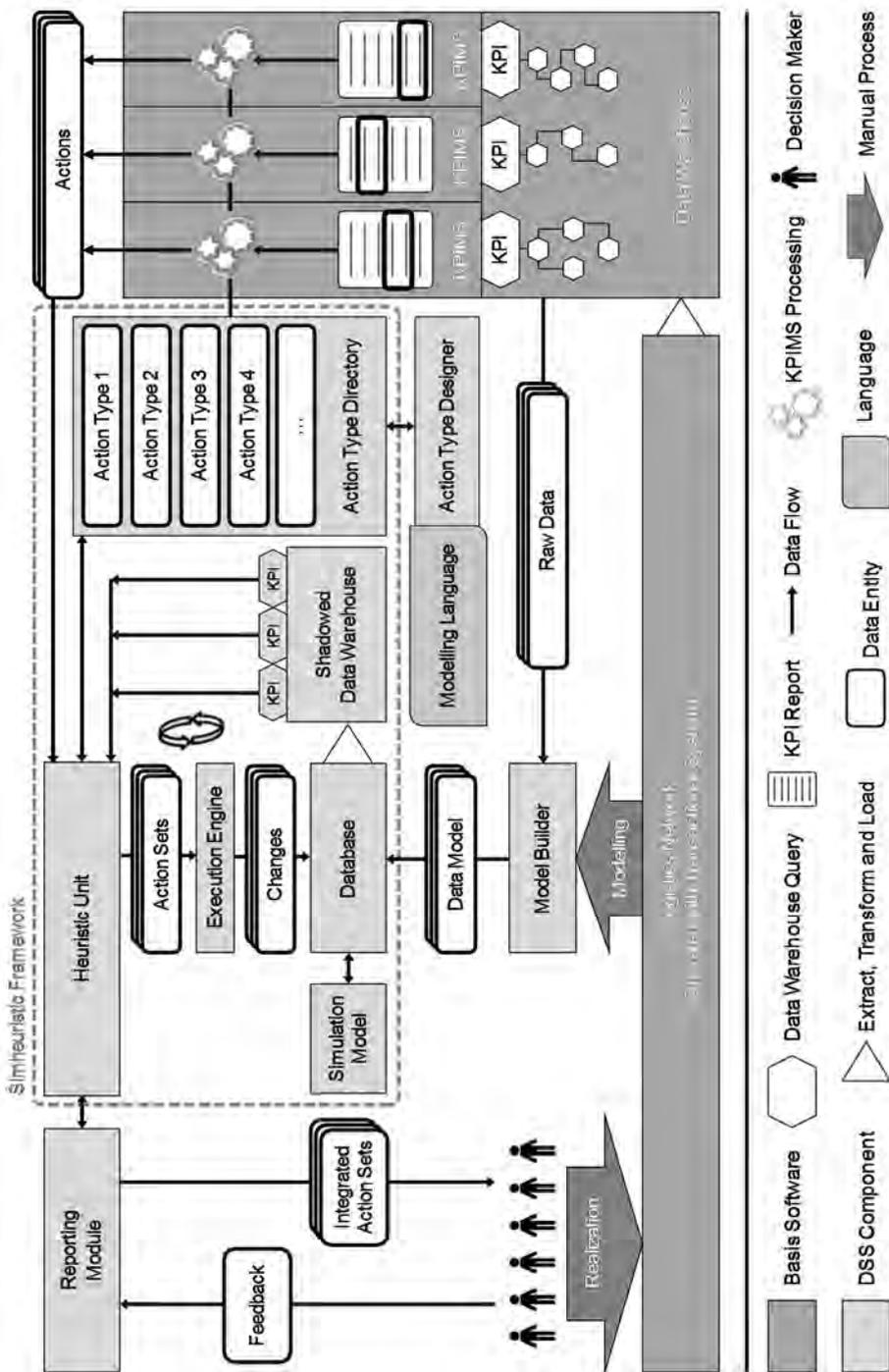


Figure 1: Architecture of the DSS (Based on Dross and Rabe 2014)

The heuristic unit can evaluate single actions as well as complete action sets. Integrated action sets can be reported to the decision makers through the reporting module. From there, the decision makers can also provide feedback to the system. The prototypical implementation of the reporting module has been realized as a web-based, responsive user interface (Rabe and Dross 2016). The prototype serves as a proof of concept, and the system is currently under further development. As an important abstraction level to actions, the concept of action types has been introduced (Rabe and Dross 2015; Rabe et al. 2017). An action type describes possible actions in a generic way. E. g., an action type might generally describe the possibility of changing the replenishment of a stock-keeping unit (SKU) in a site to a different supplier. A corresponding action could describe the change of a specific replenishment of a specific SKU in a specific site. Available action types are stored in an action type directory. In order to increase the flexibility of the DSS, a concept for extending the system with user-generated action types has been developed.

3 Modelling Language and Action Type Designer

Changing the simulation model means performing changes on one or more parts of the underlying database. In consequence, actions modifying the logistics system are directly correlated with changes in the database. These relations, however, may be very complex and have to be implemented by the user. Understanding the relations between actions and the database is inevitable for extending the system with new action types, but also for an insight into the actions' effects. In order to provide the user with an integrated and consistent way of modeling action types, the authors propose to use a domain-specific modeling language (DSML). A DSML is a language that is easy to understand by a human, but can be executed on a computer. It is focused on a clear and small domain using a bare minimum of features in order to support solving domain-specific problems (Fowler 2011). The DSML is related to multiple areas and components of the system. Therefore, the modeling language is just indicated below the simheuristic framework in Figure 1.

Action types can be created and edited in the action type designer, which is depicted as a square below the action type directory in Figure 1. The action type designer is the bridge between the modeling language and the user's view to the logistics system. All user-generated action types are saved in the action type directory. The user has access to all action types through the action type designer. He can manipulate and update them. Additionally, the user can use these action types to create new action types, e.g., by using them as a basis or by concatenating them.

Eventually, using a feasible interface to access the DSML in order to model action types should provide an easy-to-learn approach for extending the DSS with new actions for the modeled logistics network.

4 Usage Concept for Integrating New Action Types

An action type may be related to one or more areas of the underlying data model, depending on its structure. Thus, changing the data model may also lead to adjustments for corresponding action types. In order to reduce this dependency and to provide a more generic approach, the authors propose to use a reference model for the simulation data. With this approach, action types are related to the reference

model instead of being directly related to the data model. Information regarding the mapping between the reference model and the data model will be given by a mapping specification. Regarding the action type designer, the authors propose to integrate an access to the structure of the reference model from within the DSML. Thus, the modelling language provides a way of mapping actions for the modeled logistics network to corresponding changes to the reference model. Regarding the user roles, action types may be created and edited by simulation experts or KPIMS experts. A corresponding illustration is given in Figure 2. The user of the action type designer can model new action types by specifying different kinds of information, e.g., references to the corresponding tables in the reference model, required input parameters and data for identification or for increasing the understanding of the action type, such as an ID or a description. Additionally, the action types may contain domain-specific information which can be used by the heuristic unit to increase the search for integrated action sets. The user may be able to define a list of correlations between action types that can be used by the heuristic unit.

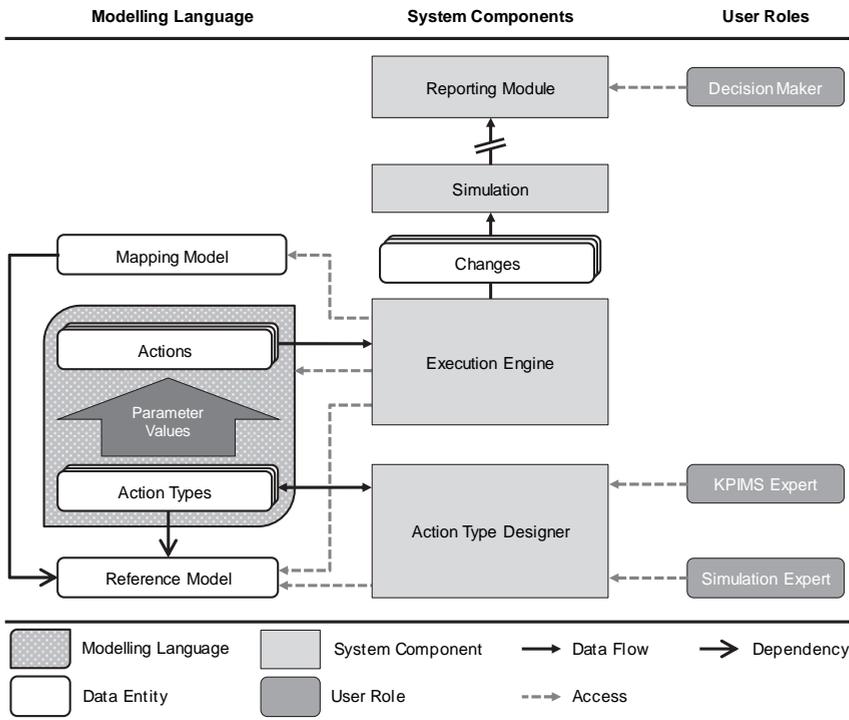


Figure 2: Modelling Language, System Components and User Roles

By analyzing correlated action types, promising candidates for further changes to the modeled system can be derived after applying an action. Additionally, a factor for the expected impact regarding its influence to the overall performance of the modeled logistics network can be given. Applying actions might be restricted by constraints, such as the requirement of a specific technique for storing certain SKUs. Complex action types, such as shifting an assortment to a central warehouse may

consist of several sub-action types, e.g., adjusting the minimum order quantity or minimum stock of corresponding SKUs, as well as removing or adding transport relations. Thus, the DSML must provide adequate constructs for concatenating action types in order to model these hierarchical structures. Instantiating an action type with parameter values will result in a concrete action. The execution engine can process this action to derive corresponding changes to the data model. Obviously, the execution engine needs access to the mapping model in order to transform actions into changes. The effects of the applied actions are evaluated by running a simulation experiment based on the modified data model. The results of the experiment are provided to the reporting model. The decision maker can access the simulation results through the reporting model.

5 Implications on the Realization of the Heuristic Unit

The heuristic unit needs to have access to actions types stored in the action type directory, in order to add corresponding possible actions to the solution space. Accordingly, decision variables define the selected actions. The heuristic unit has to determine the concrete actions and search for the most promising integrated action sets. With the new concept, the heuristic unit will also get access to all domain-specific information of action types. Hence, it can possibly utilize this information in its search. From this perspective, it can be expected that the heuristic unit can possibly fasten the selection of action sets from the solution space. Accordingly, the learning ability of the heuristic unit is expected to increase, and the search process may become faster and more effective. Furthermore, the link between the heuristic unit and the reporting module is expected to be improved. This might increase the learning ability of the heuristic unit. The heuristic unit will report its findings, most promising integrated action sets, to the decision makers. The decision makers can modify the action sets by deleting actions or suggesting actions. Additionally, feedback regarding the effects of action set realizations in the real system can be reported. As an additional benefit, the new concept could lead to a better understanding of the proposed action sets and support the search for suitable actions.

6 Approaches for the Realization of the Heuristic Unit

As shown in Figure 1, the heuristic unit interacts with the simulation model in an iterative manner. Currently, the authors implemented two different approaches for the heuristic unit, an EA implementation and a Deep Reinforcement Learning (DRL) implementation. EA has been chosen, because it has previously been successfully used in similar kinds of research (see section 2.2). On the other hand, DRL has been selected since an RL agent has the ability to learn based on rewards. This should enable the DSS to speed up the search of integrated action sets based on previous simulation runs. Experiments have been run with these prototypes to compare the performance of the selected approaches. A small-size logistic network has been used for the experiment consisting of 5 sites, 103 customers, 30 SKUs and 176 orders.

The EA mimics the biological evolution. In this approach, a possible action set is represented as an individual in a population, and discrete-event simulation is used to evaluate the fitness of the individuals. Cost and β -service level have been used as fitness values to be minimized and maximized, respectively. New individuals in the

successive generations are formed by selecting individuals from the population based on their fitness, and using cross-over or mutation. EA algorithms require the definition of parameters: cross-over probability, mutation probability, generation size, and initial individual. In addition, terminating conditions should be defined: maximum experiment time, maximum number of generations and stagnation condition. For the experiments, the following parameter values have been set: cross-over probability 70 %, mutation probability 25 %, maximum number of generations 50, maximum experiment run time 2 hours, and the NSGA2 algorithm for individual selection. The remaining parameters have been iterated according to Table 1.

DRL combines RL with a convolutional neural network. RL utilizes an agent that searches the solution space and selects actions based on their previously recorded rewards. Each action and state combination has an associated expected return $Q^\pi(s, a)$, resulting from applying action a in state s while following policy π . The Q-learning algorithm is applied in the RL as follows:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a_t) - Q(s_t, a_t)] \quad (1)$$

Where α is a learning rate parameter, r is the expected immediate reward, and γ is the discount rate parameter at time t . The learning rate has been set to 0.00025, while the discount rate parameter has been varied as in Table 2.

Tables 1 and 2 show cost reduction, β -service level improvement, the experiment run time, and the number of simulation runs during the experiments. The EA converges faster than the DRL. The EA terminates within 1.5 hours or less, depending on the parameter setting. On the other hand, DRL requires more time, but it has the ability to learn and build experience. Therefore, DRL is able to deliver an acceptable solution for a specific situation without conducting new simulation runs, just based on its experience from past experiments.

Table 1: EA experiments' parameters and performance

Initial individual size	Generation size	Cost reduction [%]	Service level improvement [%]	Run time [minutes]	Simulation runs
1	4	0.38	0.11	7	10
1	16	2.73	0.24	17	32
4	4	5.48	0.34	87	158
4	16	5.79	0.45	90	151

Table 2: DRL experiments' parameter and performance

Discount rate parameter	Cost reduction [%]	Service level improvement [%]	Run time [minutes]	Simulation runs
0.1	2.00	0.02	630	600
0.5	5.00	0.08	510	600

7 Conclusion and Outlook

The DSS presented in this paper uses a simheuristic framework. The framework allows for experimenting with different components. Since the complete interaction between the modules is done on a data base, experiments with different modules can be conducted. Thus, the simheuristic approach can be tested with different implementations for the heuristic unit. The simulation kernel could possibly be also exchanged by alternative simulation tools in the future. Therefore, the simheuristic framework already provides a very modular research approach for building a DSS for logistics networks. Furthermore, the system will now be extended with the possibility to integrate user-generated action types, which will again increase the flexibility of the system. How the heuristic unit can handle these new action types will be of special interest regarding further research. Besides this aspect, the authors plan to generally extend their research in DRL and simheuristics. Possible combinations will be considered in the future. Regarding this, a special focus will be on considering larger logistics networks, and its impact on the total simulation time.

Acknowledgement

Special thanks to thyssenkrupp Materials Services GmbH for supporting this research. The work was also supported by the German Jordanian University.

References

- Blutner, D.; Cramer, S.; Krause, S.; Mönks, T.; Nagel, L.; Reinholz, A.; Witthaut, M.: Technical Report 06009 „Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung“. ISSN 1612-1376, Dortmund, 2007.
- Bockholt, F.; Raabe, W.; Toth, M.: Logistic assistance systems for collaborative supply chain planning. *International Journal of Simulation and Process Modelling* 6 (2011) 4, pp. 297-307.
- Cabrera, G.; Niklander, S.; Cabrera, E.; Johnson, F.: Solving a distribution network design problem by means of Evolutionary Algorithms. *Studies in Informatics and Control* 25 (2016) 1, pp. 21-28.
- Deiseroth, J.; Weibels, D.; Toth, M.: Simulation-based decision support system for the disposition of global supply chains. In: Rabe, M. (Eds.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008, pp. 41-50.
- Dross, F.; Rabe, M.: A SimHeuristic framework as a decision support system for large logistics networks with complex KPIs. In: Wittmann, J.; Deatcu, C. (Eds.): *Proceedings of the 22nd Symposium Simulationstechnik, Berlin (Germany), 3rd-5th September 2014*, pp. 247-254.
- Fowler, M.: *Domain-specific languages*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley 2011.
- Fraunhofer IML: OTD-NET. 2017. http://www.ima.fraunhofer.de/de/themengebiete/supply_chain_engineering/produkte/otd-net.html. Last access 15.05.2017.
- Gutenschwager, K.; Aliche, K.: Supply Chain Simulation mit ICON-SimChain. In: Spengler, T.; Voß, S.; Kopfer, H. (Eds.): *Logistik Management*. Heidelberg: Physica 2004, pp. 161-178.

- Juan, A.A.; Rabe, M.: Combining simulation with heuristics to solve stochastic routing and scheduling problems. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Eds.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013*. Paderborn: HNI-Verlags-schriftenreihe 2013, pp. 641-649.
- Kengpol, A.: Design of a decision support system to evaluate logistics distribution network in Greater Mekong subregion countries. *International Journal of Production Economics* 115 (2008) 2, pp. 388-399.
- Kuhn, A.; Hellingrath, B.; Hinrichs, H.: *Logistische Assistenzsysteme*. In: *Software in der Logistik*. München: Huss 2008, pp. 20-26.
- Liebler, K.; Beissert, U.; Motta, M.; Wagenitz, A.: Introduction OTD-Net and LAS: Order-to-delivery network simulation and decision support systems in complex production and logistics networks. In: Pasupathy, R.; Kim, S.-H.; Tolk, A.; Hill, R.; Kuhl, M.E. (Eds.): *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*. Piscataway: IEEE 2013, pp. 439-451.
- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weiger, G., Hrsg.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Heidelberg: Springer 2011.
- Osaba, E.; Carballedo, R.; Diaz, F.; Onieva, E.; La Iglesia, I. de; Perallos, A.: Crossover versus mutation. *The Scientific World Journal*, 2014, DOI 10.1155/2014/154676.
- Rabe, M.; Dross, F.: A Reinforcement Learning approach for a decision support system for logistics networks. In: Yilmaz, L.; Chan, W.K.V.; Moon, I.; Roeder, T.M.K.; Macal, C.; Rossetti, M.D. (Eds.): *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*. Piscataway: IEEE 2015, pp. 2020-2032.
- Rabe, M.; Dross, F.: Intelligente Entscheidungsunterstützung für Logistiknetzwerke des Werkstoffhandels. *Werkstoffe in der Fertigung* (2016) 5, pp. 24-25.
- Rabe, M.; Dross, F.; Vennemann, A.: A procedure model for the credible measurability of data warehouse metrics on discrete-event simulation models of logistics systems. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Eds.): *Simulation in Produktion und Logistik 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, pp. 167-176.
- Rabe, M.; Dross, F.; Wuttke, A.: Combining a discrete-event simulation model of a logistics network with deep reinforcement learning. In: Duarte, A.; Juan, A.A.; Lourenço, H.R. (Eds.): *Proceedings of the 12th Metaheuristics International Conference (MIC)*, Barcelona (Spain) 2017, pp. 438-447.
- Rabe, M.; Gutenschwager, K.; Fechteler, T.; Sari, U.M.: A data model for carbon footprint simulation in consumer goods supply chains. In: Pasupathy, R.; Kim, S.-H.; Tolk, A.; Hill, R.; Kuhl, M.E. (Eds.): *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*. Piscataway: IEEE 2013, pp. 2677-2688.
- Shim, J.P.; Warkentin, M.; Courtney, J.F.; Power, D.J.; Sharda, R.; Carlsson, C.: Past, present, and future of decision support technology. *Decision Support Systems* 33 (2002) 2, pp. 111-126.
- SimPlan AG, 2017: SimChain. <http://www.simchain.net/>. Last access 15.05.2017.
- VDI 3633 Part 12: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Simulation und Optimierung*. Berlin: Beuth 2016.
- Zhang, T.; Xie, S.; Rose, O.: Flexible job-shop scheduling with dynamic stochastic machine sets. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Eds.): *Simulation in Produktion und Logistik 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, pp. 21-28.

Comparing Different Distance Metrics for Calculating Distances in Urban Areas with a Supply Chain Simulation Tool

Vergleich verschiedener Distanzmetriken zur Berechnung von Entfernungen in städtischen Gebieten mit einem Supply-Chain- Simulationswerkzeug

Markus Rabe, Astrid Klüter, Simon Tietze, TU Dortmund, Dortmund (Germany),
markus.rabe@tu-dortmund.de, astrid.klueter@tu-dortmund.de,
simon.tietze@tu-dortmund.de

Abstract: This paper presents a modelling approach for the simulation of supply chains including last mile delivery by using approximations. A brief introduction to the most common approximation metrics for distance calculations and their applications within the context of simulation is given. A practical example for the calculation of distances is presented using a discrete-event simulation model. By comparing different distance metrics with the real distances on an exemplary supply chain, it can be determined whether a satisfactory distance metric exists for calculating distances in urban areas, without the integration of an external route planning web service.

1 Introduction

Logistics is the basis for globalization and competitiveness. Without logistics, a successful economy or modern life cannot be shaped. A considerable amount of research has been carried out, aiming to optimize the organizational and operational practices of logistics. However, such attention has been mainly paid to inter-urban transportation, while the last mile is one of the most expensive, least efficient and most polluting sections of the entire logistics chain (Gevaers 2014). The transport volume in urban areas will continue to increase in the coming 25 years. The largest driver of this growth is e-commerce, which has shifted its focus from the B2B to the B2C segment (Joerss et al. 2016). Boyer et al. (2004) state that many e-commerce companies failed, because they could not figure out how to extend the supply chain directly to customers.

Therefore, we have conducted research to extend a supply chain simulation tool with further specific enhancements for the last mile delivery. In this context, a particular challenge is the detailed calculation of routes. If long distances across a variety of

countries have to be covered along the supply chain, a rough approximation of the distance is sufficient outside of urban areas. It can be assumed that errors will be compensated during the long journeys. As the road distances are longer than the linear distance, due to the course of the road, a correction factor is used to approximate the linear distance to the road kilometres (Krarup and Pruzan 1980). This factor is between 1.1 and 1.5 and depends on the area. However, it is not evident whether this approximation can also be applied for last mile delivery or whether the error would become very large in this case.

The aim of this paper is to analyze whether a satisfactory distance metric exists for calculating distances in urban areas using a supply chain simulation tool, without the integration of an external route planning web service. There are multiple reasons for this: License issues with respect to the web services, a limited number of free-of-charge queries per day, or the necessity for a stable internet connection and a stable web service. Besides, the communication occurs directly over the Internet which leads to a poor performance. Due to performance reasons, a route planner in offline mode during the simulation is not an option either.

In this paper, we analyze the most common distance metrics and compare them to the real distances in an exemplary urban area, in order to verify whether a suitable distance metric exists. This is one of the main elements to ensure an integrated view of the whole supply chain network including last mile deliveries.

2 Urban Goods Movements and Supply Chain Simulation

Gonzalez-Feliu and Routhier (2012) analyze the different concepts for the construction of models and their further developments in the context of urban goods movement (UGM). In the course of this, a classification of the UGM models is defined, which can be divided into four groups: Models that analyze the current situation; models that simulate a current situation, optimization models, and discrete-event simulation models that create a reliable outcome forecast for the future. As a result, the authors recommend a strategy for creating meta-models by combining the existing models as this generates synergy effects. Kokkinogenis et al. (2011) consider several traffic simulation tools, which they divide into the following four levels: macroscopically, mesoscopically, microscopically, and nanoscopically. The elaborated overview describes seven simulation tools with a focus on simulations and functionalities that could be used to assess urban traffic. Friedrich (2010) stresses the importance of a meso level, to be able to aggregate or disaggregate between the macro and micro level. An example is the transition from transport demand of individual companies in the form of commodity flows (micro level) to the vehicle flows on the network (macro level), which is very complex. He also states that tours are often modelled by urban commercial traffic models, which do not reflect the perspective of a logistic decision maker. The simulation model SYNTRADE is introduced, which first generates a realistic logistic environment within the food industry, in order to determine warehouse structures using an optimization heuristic and to finally simulate the distribution to end customers. However, it seems that the abstraction level is too high to use route planning to end customers within the urban area.

When looking at forecasting modelling efforts, different classes of models can be detected, which highlight the urgent need for holistic approaches. In Fischer (2005) and Chow et al. (2010), two classes of freight demand models exist: Logistics models and vehicle touring models. Comi et al. (2012) state that the demand models have been classified in four models: Truck, commodity, delivery and mixed, the last one being the most promising model, as it enables a direct link between the interacting behaviours of commodity consumers and suppliers/shippers/retailers. Nevertheless, in the current urban freight demand modelling literature, the relation between these actors is not sufficiently investigated. In recent years, the attention for freight modelling has been growing, while in new research, logistics is integrated in freight models (Tavasszy 2012). Russo (2013) presents an integrated modelling system that enables a linkage between end customer choices and restocking decisions from retailers.

An overview of simulation-based models that focus on urban freight tours can be found in Holguín-Veras et al. (2013). Goyal et al. (2016) have shown the significant advantages of hyperconnected furniture logistics through a simulation-based analysis. Different scenarios have been created, e.g. to share distribution centres (DCs) or the fleet, or to change the location of some DCs. However, the focus still lies on the last mile delivery.

The field of supply chain simulation is very broad. For an initial overview, surveys on supply chain simulation tools and techniques can be found in Kleijnen (2005) and Terzi and Cavalieri (2004). There are many applications of supply chain simulation. Hence, we are focusing on Discrete-Event Simulation (DES) and the food industry as applied in this work. Hellström and Johnsson (2002) use DES for supply chain planning. The authors van den Vorst et al. (2009) developed a simulation tool called ALADIN™, which takes into account the quality deterioration of perishable goods in the transport chain. The aim is to reduce product waste.

The study of the literature has shown that most publications focus either on the simulation of UGM and tour planning or on the simulation of supply chains. Nevertheless, the holistic view of the entire supply chain is still missing. To our best knowledge, there is no published application that integrates supply chain simulation in the food industry with route planning algorithms to the last mile, except experimental individual case solutions. Quantitative assessments of supply chain efficiency metrics are considered as a main focus and form the basis for objective comparison of different scenarios. The simulation model specifically addresses the objectives and processes of supply chains and urban freight as well as the analyses of practical solutions for collaborative business behaviour, taking into account the specific requirements of food logistics. A first approach for the work described below has been made by Rabe et al. (2016).

In the area of network research, different methods of the graph theory are applied to the simulation in a logistical context, e.g. the Dijkstra algorithm. The problem with respect to simulation is that graph theory methods lead indeed to a fast calculation, but have high storage requirements, or vice versa (Alanis 2014). Thus, it is worth considering methods to estimate travelled distances.

Different approximation metrics for distance calculations are known and practically applied in the area of health service research, as part of health system research in general (Apparicio et al. 2008). Euclidean and Manhattan distances are often

sufficiently accurate for research questions in this context. The considered nodes are not merged to a real network, but have instead a link to a special characteristic of the health system, known as star topology. Hence, the research subject cannot be considered as a network comparable to a supply chain network in city logistics.

Topics in other research areas require a more accurate distance approximation for simulation issues. For example, Cleophas and Ehmke (2014) use the weighted Euclidean distance as part of the discrete-event simulation for distance approximation, in order to explore the value-based demand fulfilment. The subject of their research activities is linked to the last mile delivery in a supply chain network. Hoerstedt (2014) examines the electric mobility in the metropolitan area Bremen/Oldenburg (Germany). He uses a multi-agent system for the simulation of distance travelling and respectively the energy consumption. For distance calculations, the same method and factor from Cleophas and Ehmke (2014) are applied. While Cleophas and Ehmke do not offer an explanation for the choice of the weighting factor, Hoerstedt (2014) notes that the weighting factor is detected by best-fit through different experiments.

A more precise distance approximation method is the Minkowski distance. The Minkowski distance can be seen as a generalization of the Euclidean and the Manhattan distance. The following calculation method specifies the Minkowski distance between two nodes a and b in \mathbb{R}^n :

$$d_{ab} = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

$d = \text{distance}$
 $a, b \in \mathbb{R}^n$
 $p = \text{variable order}$

For the two-dimensional Euclidean space, the complex calculation method can be simplified to the following calculation scheme:

$$d_{ab} = \sqrt[p]{(a_i - a_j)^p + (b_i - b_j)^p} \quad (2)$$

For $p = 2$, it is the Euclidean distance; for $p = 1$, it is the Manhattan distance. Finally, for the values between 1 and 2, the Minkowski metric results in a wide range of distances.

Besides the Euclidean and Manhattan distance, the weighted Euclidean distance and the Minkowski distance, the exponential Euclidean distance is proposed for distance approximation in road distance calculation (Morris and Love 1972).

In the following, the conventional approximation methods like Manhattan or Euclidean distance are compared with more exact approximation methods like Minkowski distance as well as the weighted and exponential Euclidean distance. Figure 1 illustrates the different approximations.

In order to measure the quality of the different methods, two common comparison criteria in statistical geographic research (referred to as AD and SD) are applied. In this application case, AD sums up the absolute failures between real and approximated distance. SD represents the weighted sum of squared absolute failures between real

and approximated distance (Morris and Love 1972). The criterion AD is useful, because long distances have to be approximated more precisely than short distances. The criterion SD does not focus on the difference between long and short distances like AD, but measures the goodness of fit of all considered distances. Additionally, some statistical key figures are applied for the comparison of the approximation metrics.

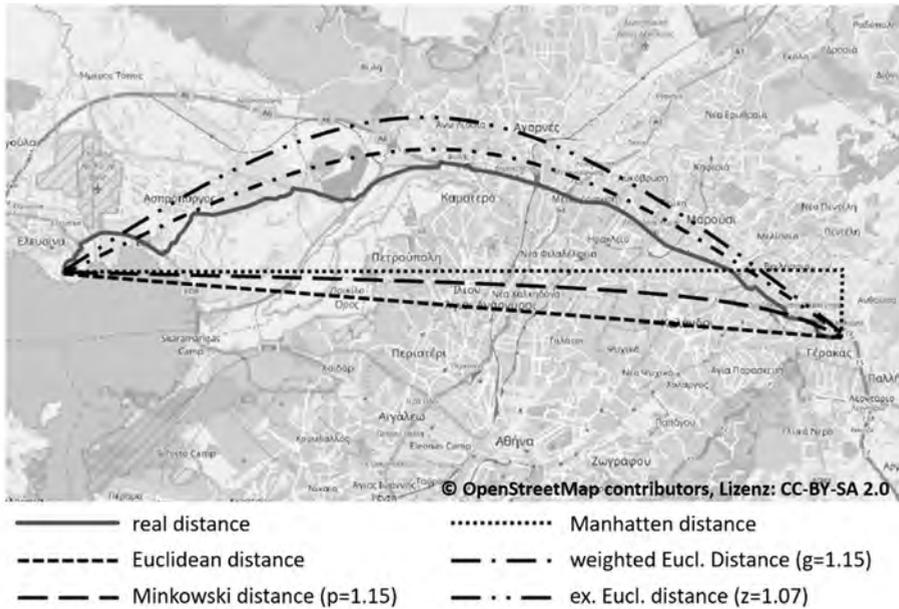


Figure 1: Example of a delivery route in the metropolitan area of Athens

3 Solution Approach

When looking at delivery practices, the cause-effect relationships within the whole supply chain should be considered. Therefore, we are using the simulation tool SimChain (Gutenschwager and Aliche 2004). It is a discrete-event supply chain simulation tool, which has been developed as a class library for the simulation tool Plant Simulation. SimChain consists of three major parts: A graphical user interface used for model configuration, a database in which all configuration data and simulation results are stored, and a DES Supply Chain Simulation Framework based on Plant Simulation. While the toolset offers features for order policy, stock and volume logistics or different means of transport, it lacks specific details in the consideration of city logistics and food transportation. Regarding the distance calculation, the simulation tool has no interface to a web service, but calculates the distances from the geo coordinates.

Our work deals with supply chain simulation including last mile deliveries for fresh food products in a historical European city and analyses the distance calculation of final deliveries to supermarkets in the urban area. The metropolitan area of Athens, Greece, has been selected for our case study, because it is the most populous and

largest city in Greece and because there is immense road traffic in the narrowly developed centre of Athens. The area can be specified by the ZIP codes from 10xxx to 19xxx. Both the area with ZIP codes beginning with 18xxx and the islands of the Attica are excluded for further exploration, because we are focusing on city logistics. This led to a sample size of 6,779 routes. Figure 2 illustrates the area under investigation.



Figure 2: Representation of the area under investigation

At first, different approximation metrics (conventional and more newly reported) for distance calculations are selected from literature. The approximation metrics are applied to Attica as the area of this study. The results are explained through statistical key figures, in order to be able to compare distance approximation metrics, as shown in Table 1. Special attention is given to the weighted Euclidean distance with $g = 1.3$ as this is the approximation which is currently used for the simulation. Here, the distance for each trip is calculated as the Euclidean distance between origin and destination, multiplied with the factor 1.3.

The overall conclusion is that the different distance metrics achieve surprisingly good results according to the real distances.

At first, the maximum and minimum of each metric spread out a range similar to the one of the real distance with small differences, only. Furthermore, the standard deviation indicates whether the mean is representative for the whole distribution. The standard deviation of the approximation methods and the distribution of the real distances are very high and consequently not representative for the distribution itself. But, in this case, it is not necessary that the mean is representative for the whole distribution. It is more important that the approximation metrics generate standard deviations and means that are alike to the values of the distribution of real distances. The optimized approximation metrics are generating values in mean and standard deviation that are similar to the distribution of real distances. Only the Euclidean distance generates a lower range, a lower mean and a lower standard deviation in contrast to the real distances.

Table 1: Key figures of different distance metrics (R = Range; σ = Standard Deviation; $wg.$ = weighted; $eucl.$ = Euclidean; $ex.$ = exponentiated).

Metric	Min	Max	R	Mean	σ	AD	SD
Real distance	0.4	78.3	77.9	8.9	9.1		
Euclidean distance	0.2	59.4	59.2	7.1	7.3	1,1980.9	2,735.6
Manhattan	0.2	83.9	83.7	9.0	9.3	7,137.8	1,241.6
Minkowski distance ($p = 1.15$)	0.2	76.7	76.5	8.4	8.6	6,017.5	995.0
wg. eucl. distance ($g = 1.225$)	0.2	72.4	72.2	8.7	8.9	4,334.0	540.8
wg. eucl. distance ($g = 1.25$)	0.2	74.2	74.0	8.9	9.1	4,413.1	539.6
wg. eucl. distance ($g = 1.3$)	0.3	77.2	76.9	9.2	9.5	5,184.8	682.7
ex. eucl. distance ($z = 1.07$)	0.2	79.0	78.8	8.4	9.3	5,532.9	910.5
ex. eucl. distance ($z = 1.08$)	0.2	82.3	82.1	8.6	9.6	5,589.5	896.3

Based on the criteria AD and SD, the conventional approximation methods result in weaker outcomes compared to the optimized forms of the newer approximation methods. The outcomes for AD and SD for the Euclidean distance are often twice as high as the outcomes for the newer approximation methods. Remarkable is the fact that the values for the criteria AD and SD for the Manhattan distance are higher than the other approximation metrics, but generate a surprisingly good distribution towards the real distances. Summing up the observations of AD and SD, the Euclidean and Manhattan distances are really weak for distance approximation. The focus should be on the newer approximation methods.

Even for the newer approximation metrics, large differences exist between the Minkowski distance and the weighted as well as the exponentiated Euclidean distance, taking into consideration the criteria AD and SD. As can be seen in Figure 1, in respect of the good results of the weighted Euclidean distance ($g = 1.25$), the real route is illustrated well. In relation to the criteria AD and SD, the weighted and exponentiated Euclidean distances generate better results than the optimized Minkowski distances (Tab. 1). The Euclidean distance weighted with ($g = 1.3$) produces the largest arithmetic mean and the second largest standard deviation.

The optimized p values regarding a specific distance metric are very near for both criteria AD and SD. Hence, it is not possible to approximate long distances better than short distances. This might be an indicator for a very dispersive structure of the road

network in the considered research area. Therefore, the weighted or exponentiated Euclidean distances are more applicable than the Minkowski distance.

The above impressions are supported by the view on the boxplot diagram (Fig. 3). It visualizes the location and dispersion of failures between the real distance and the approximation of it. The mean of the weighted Euclidean distance ($g = 1.25$) is 0, which at the same time matches the median. Thus, the mean is not influenced by strong outliers in contrast to the weighted Euclidean distance ($g = 1.3$) and the Minkowski distance ($p = 1.15$). The mean of the weighted Euclidean distance ($g = 1.3$) is distorted downwards and for the Minkowski distance ($p = 1.15$) upwards.

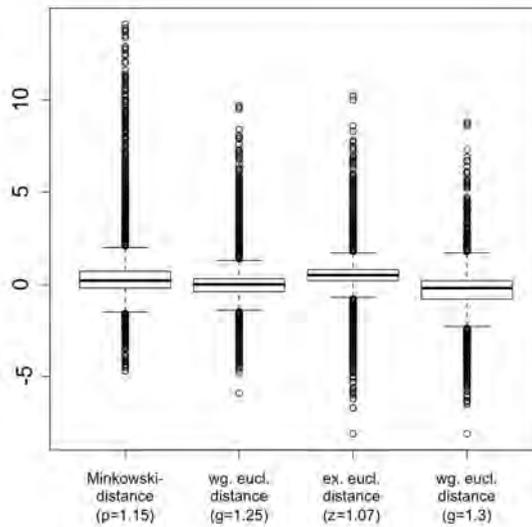


Figure 3: Boxplot of several distance metrics

Overall, it can be summarized that the distance approximation based on the weighted Euclidean distance with $g = 1.25$ is producing the best results compared to the other optimized distance metrics and the weighted Euclidean distance with $g = 1.3$ taken from the literature review. We can conclude that general parameters from the literature review do not necessarily fit properly to approximate the distance. Therefore, it is advisable to investigate the parameters for every approximation metric taking the specific properties of the network into consideration. With regard to the problem of expensive and least efficient delivery on the last mile in urban areas, it seems important to simulate the network and distances in order to ensure precise results.

4 Conclusion and Outlook

In this paper, we presented a possibility to integrate last mile deliveries to end customers in urban areas in supply chain simulation. For this purpose, we analysed whether a satisfactory distance metric exists for the calculation of distances, without the integration of an external route planning web service. We can conclude that the common approximations achieve excellent results compared to the real distances.

As a next step, we will test our concept for another city with a different road network. For example, the cityscape of an American city is very homogeneous and uniform, especially due to the chessboard layout. This is the exact opposite of medieval cities with their labyrinth of many small streets and alleys.

If it is not possible to find a good approximation, we have to manually calculate the real distances within the framework of data pre-processing, before running the simulation experiments. This means that we then need to find a way to provide this information, when generating the data model for the simulation.

References

- Alanis, R.: Efficient storage of transport network routes for simulation models. In: Tolk, A.; Diallo, S.Y.; Ryzhov, I.O., Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J.A.: (Eds.): Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference (WSC), Savannah (USA) 2014, pp. 1931-1942.
- Apparicio, P.; Abdelmajid, M.; Riva, M.; Shearmur, R.: Comparing alternative approaches to measuring the geographical accessibility of urban health services: distance types and aggregation-error issues. *International Journal of Health Geographics* 7 (2008) 7, pp. 7-21.
- Boyer, K.K.; Frohlich, M.T.; Hult, T.G.: Extending the supply chain: how cutting edge companies bridge the critical last mile into customers' homes. New York: American Management Association 2004.
- Chow, J.Y.J.; Yang, C.H.; Regan, A.C.: State-of-the art of freight forecast modeling: lessons learned and the road ahead. *Transportation* 37 (2010) 6, pp. 1011-1030.
- Cleophas, C.; Ehmke, J.F.: When are deliveries profitable? - Considering order value and transport capacity in demand fulfillment for last-mile deliveries in metropolitan areas. *Business & Information Systems Engineering* 6 (2014) 3, pp. 153-163.
- Comi, A.; Delle Site, P.; Filippi, F.; Nuzzolo, A.: Urban freight transport demand modelling: a state of the art. *European Transport/Trasporti Europei* 51 (2012) 7, pp. 1-17.
- Fischer, M.; Outwater, M.; Cheng, L.; Ahanotu, D.; Calix, R.: Innovative framework for modeling freight transportation in Los Angeles county, California. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1906. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies 2005, pp. 105-112.
- Hellström, D.; Johnsson, M.: Using discrete event simulation in supply chain planning. In: Solem, O. (Eds.): Proceedings of the 14th annual conference for Nordic researchers in logistics. Trondheim: NOFOMA 2002, pp. 13-28.
- Holguín-Veras, J., Thorson, E.; Wang, Q.; Xu, N.; González-Calderón, C.; Sánchez-Díaz, I.; Mitchell, J.: Urban freight tour models: state of the art and practice. In: Ben-Akiva, M.; Meersman, H.; Van de Voorde, E.: *Freight Transport Modelling*. Bingley: Emerald Group Publishing Limited 2013, pp. 335-352.
- Gevaers, R.; van de Voorde, E.; Vanelslander, T.: Cost modelling and simulation of last-mile characteristics in an innovative B2C supply chain environment with implications on urban areas and cities. In: *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 125 (2014), pp. 398-411.

- Goyal M.; Cook, J.; Montreuil, B.; Kim, N.; Lafrance, C.: Hyperconnected city logistics for furniture and large appliance industry: Simulation-based Exploratory Investigation, 3rd International Physical Internet Conference. July 2016. http://www.pi.events/IPIC2016/sites/default/files/Workshop_TA1_Hyperconnected_City_Logistics_for_Furniture_Large_Appliance_Industry.pdf. Last access: 12.05.2017.
- Gutenschwager, K.; Aliche, K.: Supply Chain Simulation mit ICON-SimChain. In: Spengler, T.; Voß, S.; Kopfer, H. (Eds.): Logistik Management. Heidelberg: Physica 2004, pp. 161-178.
- Hoerstebroek, T.: Strategische Analyse der Elektromobilität in der Metropolregion Bremen/Oldenburg – Multi-Agenten basierte Simulation alternativer Antriebssysteme. Diss. Oldenburg: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2014.
- Kleijnen, J.P.C.: Supply chain simulation tools and techniques: A survey. *International Journal of Simulation and Process Modelling* 1 (2005) 1-2, pp. 82-89.
- Joerss, M.; Schröder, J.; Neuhaus, F.; Klink, C.; Mann, F.: Parcel delivery: The future of last mile. McKinsey&Company study. Sept. 2016. https://www.mckinsey.de/files/2016_the_future_of_last_mile.pdf. Last access 10.02.2017.
- Krarp, J.; Pruzan, P. M.: The impact of distance on location problems. *European Journal of Operational Research*, 4 (1980) 4, pp. 256-269.
- Morris, J.G.; Love, R.F.: Modelling inter-city road distance by mathematical functions. *Journal of the Operational Research Society* 23 (1972) 1, pp. 61-71.
- Rabe, M.; Klüter, A.; Clausen, U.; Pötting, M.: An approach for modeling collaborative route planning in supply chain simulation. In: Roeder, T.M.K.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E.: Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, Arlington (VA). Piscataway: IEEE 2016, pp. 2228-2238.
- Russo, F.: Modeling behavioral aspects of urban freight movements. In: Ben-Akiva, M.; Meersman, H.; Van de Voorde, E.: Freight Transport Modelling. Bingley: Emerald Group Publishing Limited 2013, pp. 353-375.
- Tavasszy, L.A.; Ruijgrok, K.; Davydenko, I.: Incorporating logistics in freight transport demand models: state-of-the-art and research opportunities. *Transport Reviews* 32 (2012) 2, pp. 203-219.
- Terzi, S.; Cavalieri, S.: Simulation in the supply chain context: a survey. *Computers in Industry* 53 (2004) 1, pp. 3-16.
- van der Vorst, J.G.; Tromp, S.-O.; van der Zee, D.-J.: Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research* 47 (2009) 23, pp. 6611-6631.

A Simulation-Optimization Approach for the Two-Echelon Location Routing Problem Arising in the Creation of Urban Consolidation Centres

Eine simulationsgestützte Optimierung des mehrstufigen Location Routing Problems im Kontext urbaner Konsolidierungszentren

Aljoscha Gruler, Angel A. Juan, Universitat Oberta de Catalunya,
Barcelona (Spain), agruler@uoc.edu, ajuanp@uoc.edu

Astrid Klüter, Markus Rabe, TU Dortmund, Dortmund (Germany),
astrid.klueter@tu-dortmund.de, markus.rabe@tu-dortmund.de

Abstract: With rising urban population numbers around the world, innovative city logistics concepts such as the creation of urban consolidation centres are gaining increased attention from practitioners and researchers. A common optimization challenge arising in this context is the two-echelon location routing problem (LRP-2E), which combines facility location and vehicle routing decisions in multi-level supply chains. However, most existing solving methodologies for this problem setting are purely optimization-focused and make simplifying assumptions about the availability and accuracy of input variables. This work discusses the integration of simulation techniques into a heuristic multi-start optimization framework to solve the LRP-2E with stochastic customer demands. Computational experiments are conducted with real-life data based on a fast-moving consumer goods supply chain in the metropolitan area of Athens.

1 Introduction

The establishment of efficient and sustainable city logistics systems is of major importance in the creation of liveable, environmentally-friendly, and healthy urban areas (Taniguchi et al. 2014). In this context, collaborative supply chain strategies constitute promising approaches to reduce the negative effects of road freight transportation (Leitner et al. 2011; Pomponi et al. 2015). On the one hand, operational cooperation includes the exchange of customer orders, vehicle capacities, and information between different supply chain actors. On the other hand, tactical and strategic collaboration concepts involve higher degrees of collaboration. Moreover, collaboration concepts are typically long-term focused agreements in contrast to more short-term focused operational cooperation scenarios. One promising collaboration concept to reduce the negative externalities

of urban road freight transportation involving an advanced level of company interaction is the construction of urban consolidation centres (UCCs). Instead of directly serving customers located within city borders from different delivery points, consolidated final customer deliveries from one or several companies are completed from these satellite facilities, which are typically situated near to city. This allows for using smaller delivery trucks with higher vehicle utilization levels (Savelsbergh and van Woensel 2016).

Through the construction of UCCs, multi-level distribution networks are supported from which a range of combinatorial optimization problems (COPs) can be deduced. While satellite locations are typically defined through the capacitated location routing problem (CLRP) (Prodhon and Prins 2014; Quintero-Araujo et al. 2016), multi-level vehicle routing problems (VRPs) such as the two-echelon VRP arise in the creation of efficient delivery routes (Cattaruzza et al. 2015). The two-echelon LRP (LRP-2E) solved in this work combines these NP-hard optimization problems. An illustrative LRP-2E example solution can be seen in Figure 1. Apart from establishing first-level (from the central depots to the UCCs) and second-level (from the UCCs to the final customers) routing plans, the most efficient satellite facilities from a set of possible locations need to be defined.

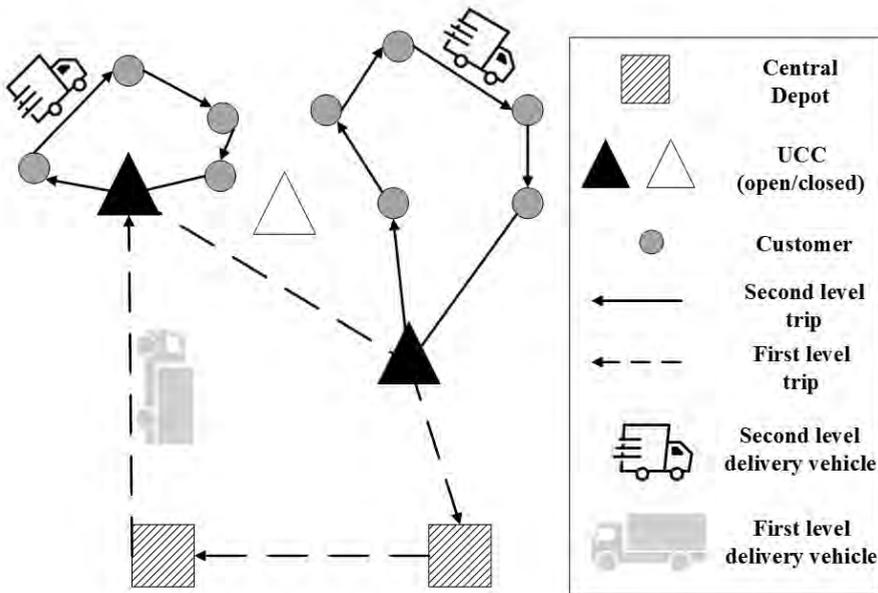


Figure 1: Example of a LRP-2E solution

Most solving methodologies for the LRP are only able to solve oversimplified versions of the problem by assuming all necessary information (e.g. travel times, customer demands, etc.) to be perfectly known in advance. To overcome this drawback, we introduce Monte Carlo simulation into a heuristic solving framework based on biased randomization (Juan et al. 2013). By simulating different uncertainty scenarios concerning final customer demands, our simheuristic approach

(Juan et al. 2015) allows for considering stochastic objective function estimates in the solution construction. Moreover, the simulation phase yields further decision-making information, which can be used to establish a risk/reliability analysis of different LRP-2E solutions.

In this paper, relevant literature is reviewed in Section 2; our simheuristic solving methodology is outlined in Section 3; Section 4 describes the experiment design based on a real-life case study with several hundred customer nodes and various potential capacitated UCC locations to test the performance and behaviour of our solving framework; finally, Section 5 concludes this work and highlights possible future research lines.

2 Related Work

A comprehensive survey on two-echelon routing problems was recently presented by Cuda et al. (2015). The authors highlighted three problem extensions according to the involved level of tactical and strategic planning decisions:

1. the tactically focused two-echelon VRP in which routing plans between different echelons are established;
2. the two-echelon LRP in which strategic facility location decisions are included; and
3. truck-and-trailer problems, in which customers are served by different trucks and trailers according to a set of restrictions.

The authors conclude that the current literature on two-echelon routing problems is still lacking the consideration of input uncertainty.

Drexl and Schneider (2015) have reviewed relevant literature on variants and extensions of the location-routing problem. Even though multi-echelon problem settings were not considered, the authors highlighted the use of simulation to solve the LRP with stochastic demands as done by Mehrjerdi and Nadizadeh (2013). These authors proposed a greedy clustering method to solve the capacitated location routing problem. In this method, customer demands are simulated using fuzzy logic. The same authors later extended their solving approach with an Ant Colony Optimization metaheuristic (Mehrjerdi and Nadizadeh 2016). While their solving methodology has similarities to the one described in this paper, the authors do not consider multiple echelons. Furthermore, our simheuristic allows for applying any kind of probability distribution, instead of relying on fuzzy logic to account for demand stochasticity.

Recently, further extensions to the LRP-2E have been presented. Rahmani et al. (2015) introduced the two-echelon, multi-product LRP with Pickup and Delivery (LRP-MPPD-2E). They put forward two types of local search methods for the routing and location part of the algorithm. Later, Rahmani (2016) proposed a mixed-integer linear model for small-scale instances and extensions of some nearest neighbour and insertion approaches for the same problem setting. The author developed new clustering-based approaches for location routing problems. Computational experiments showed that the clustering approach is very competitive and outperforms other heuristics for smaller problem instances with less than 200 nodes. Dalfard et al. (2013) applied hybrid genetic and simulated annealing algorithms for the LRP-2E with vehicle fleet capacity and maximum route length

constraints. The authors compared their results to solutions obtained with the software LINGO, suggesting that their proposed algorithm is more effective. Vidović et al. (2016) presented a mathematical formulation of a two-echelon location-routing problem in case of recycling logistics networks. Collecting points between end customers and transfer stations are defined using a mixed-integer linear programming model that maximizes the profit and creates a distance-dependent collection rate. For solving large problem instances, the authors put forward heuristic solving approaches.

3 Solving Approach

A flowchart of our simheuristic solving framework for the LRP-2E with stochastic demands can be seen in Figure 2. During a predefined stopping criterion (a maximum number of iterations is used in this work), m satellite facilities are randomly opened while ensuring that the overall UCC capacity can serve overall final customer demands. Within each algorithm iteration, the first-level routing costs between the central depots and the opened UCC locations are calculated with a nearest neighbour heuristic. It is assumed that a single vehicle tour is sufficient to stock all these UCCs. Moreover, different routing maps are established by assigning a sub-set of all final customers to each UCC by a round-robin criterion. Hereby, each UCC iteratively ‘chooses’ the next customer to be served from the non-assigned clients according to its geographical proximity.

Subsequently, different delivery routing plans are established for each routing map consisting of a satellite location and the assigned sub-set of final customers. Within a multi-start framework, an efficient routing plan is created by using a biased-randomized version of the well-known Clarke-and-Wright savings (CWS) heuristic (Clarke and Wright 1964). Whereas the original savings heuristic constitutes a greedy solution construction procedure, biased randomization is used to introduce a probabilistic behaviour during the establishment of new routing plans (Juan et al. 2013). Based on a geometric distribution parameter α ($0 < \alpha < 1$), edges are added to the currently constructed solution according to their expected savings values. Hereby, edges with higher savings values are more likely to be added to a solution with probabilities biased towards the most promising edges.

During this optimization phase, deterministic (expected) final customer demands $E[D_i]$ are considered at each client i . Whenever the deterministic costs of a new single VRP solution *newSol* outperform the deterministic costs of the currently incumbent solution *currentBest*, it undergoes a simulation phase to account for demand uncertainty. The simulation procedure is only applied to promising deterministic routing plans to avoid jeopardizing computational times through extensive simulation runs. For each promising *newSol*, final customer demands of each client are simulated from a lognormal probability distribution during $nSim$ simulation runs. We assume that our simheuristic methodology is flexible enough to incorporate any other kind of suitable probability function at this stage. In order to construct the lognormal distribution, expected demand values $E[D_i]$ are used as distribution mean. Furthermore, stochastic demands are formulated as $Var[D_i] = k \cdot E[D_i]$, which allows for considering different demand variance levels k . The special case of a variance level equal to zero ($k = 0$) corresponds to the deterministic problem setting.

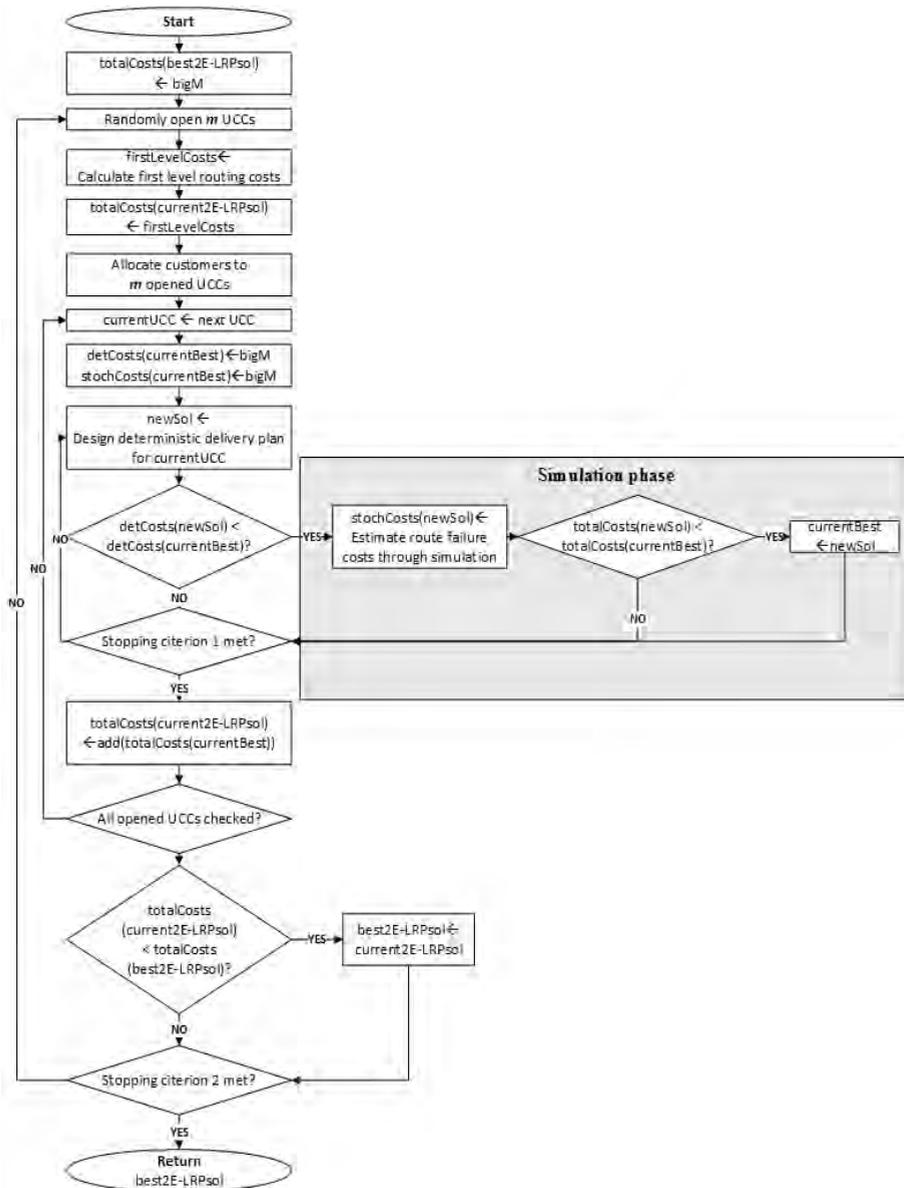


Figure 2: Flowchart of Simheuristic solving methodology for the LRP-2E

Due to the stochastic nature of customer demands, a vehicle completing a pre-established delivery route might run out of stock before the planned route is completed whenever simulated demands exceed the vehicle capacity. In cases of such route failures, an additional trip to the corresponding UCC is necessary. For this reason, a route failure is penalized with a round trip from the customer at which the vehicle runs out of stock to the respective satellite location. The total route

failure costs occurring during the simulation phase are considered in order to estimate the expected stochastic costs of an established solution. Thus, the total costs of a new single VRP solution are estimated as the sum of the deterministic routing costs and the expected route failure costs obtained during the simulation phase. Whenever the total costs of any *newSol* outperform the total costs of the current best found solution *currentBest*, the incumbent solution is updated.

Once the multi-start algorithm for a single UCC and its assigned clients is completed, the described process is repeated for all opened satellite locations. Finally, the quality of a LRP-2E is defined as the total routing costs (considering the deterministic and stochastic values) of serving all clients in addition to the first-level routing costs to stock all UCC locations. The inclusion of simulation in the described procedure leads to two kinds of advantages: On the one hand, a reliable estimate of the overall solution costs in an uncertainty scenario is obtained. On the other hand, the expected route failure costs calculated during the simulation are used to define incumbent VRP solutions for each UCC to guide the heuristic solution search under the consideration of stochastic customer demands. Moreover, the simulation phase allows for comparing different LRP-2E solutions along additional decision dimensions, instead of solely focusing on expected routing costs. Indeed, decision-takers might be interested in information such as the standard deviation or different quantiles of results obtained during the simulation runs, as a possible measure of the reliability associated with a solution.

4 Experimental Design and Analysis of Results

The simheuristic algorithm is implemented as a Java application and run on a personal computer with 4GB RAM and an Intel Pentium processor with 2.16GHz. The necessary algorithm parameters to complete the tests described in the following are defined as follows:

- Geometric distribution parameter α : 0.3 (defines the selection probabilities of different edges during the biased randomized solution construction procedure)
- Multi-start stopping criterion 1: 10 iterations (defines the number of created LRP-2E solutions)
- Multi-start stopping criterion 2: 200 iterations (defines the number of times the CWS heuristic is applied to construct new single-VRP solutions)
- Simulation runs $nSim$: 500
- Demand variance k : 2
- UCC capacity: 1000
- First-level vehicle capacity: 5000
- Second-level vehicle capacity: 100

To validate our simheuristic solving framework, it is tested on a real-life case based on a fast-moving consumer goods supply chain operating in the metropolitan area of Athens (Greece). A total of 342 customers scattered around the city centre are currently directly supplied from five different depots (highlighted with the warehouse symbols in Figure 3). All depots, UCCs, and customer locations are given as geographic longitude and latitude coordinates. Distances between any two nodes are calculated as Euclidean distances. The overall costs (calculated with the biased randomized CWS in combination with simulation as described) of serving all

customers with the current depot and customer assignments and no satellites are outlined in Table 1. All clients are currently served on 22 routes with a deterministic routing distance of 1895 km. Additionally, route failure costs mount to an expected value of 179 km.

Table 1: Current costs of serving all customers without the use of UCCs

Depot	# UCCs	# Customers	Demand	Det. Costs	Stoch. Costs	Total Costs	# Routes
1	0	63	372	375	32	407	4
2	0	87	479	586	75	663	5
3	0	105	607	413	36.	449	7
4	0	42	213	215	11	226	3
5	0	45	230	304	24	328	3
Total	0	342	1901	1895	179	2074	22

In order to test the effect of collaboration among suppliers in a city logistics context, five random UCC locations around the city centre are defined. Figure 3 outlines the geographic locations of all these satellite locations (star symbols). As a larger vehicle is used to complete the first level-routes, the routing costs for the replenishment to all UCCs are multiplied by 2, as proposed by Nguyen et al. (2012).



Figure 3: Location of depot and UCCs

The ten best 2E-LRP solutions are listed in Table 2. The best solution yields total costs of 1284.62, outperforming the current non-collaborative solution by over 38%. Moreover, the results suggest that a lower number of UCCs leads to the best overall LRP-2E results. However, the stochastic costs seem to decrease with a higher number of opened UCCs, since a higher number of satellite locations decreases the penalization costs of returning to the UCC in case of route failures.

Table 2: Overview of different LRP-2E solutions

Sol	# UCCs	Det. Costs	Stoch. Costs	First-level Costs	Total Costs	# Routes
1	2	975	76	232	1284	20
2	2	1047	96	222	1366	21
3	2	1033	93	240	1367	20
4	2	1093	81	232	1407	20
5	3	1158	80	240	1478	20
6	4	1302	81	247	1632	21
7	4	1332	49	254	1637	22
8	4	1341	55	241	1638	22
9	4	1438	68	241	1748	22
10	5	1556	68	251	1875	22

5 Conclusions

This work proposes a simheuristic solving methodology for the two-echelon location routing problem (LRP-2E) arising in the establishment of urban consolidation centres (UCCs) in city logistics. By integrating simulation into a heuristic multi-start procedure based on biased randomization, stochastic final customer demands are taken into account. The algorithm has been tested on a real-life supply chain setting in the Greek capital Athens with various depots and over 300 final customers. A comparison between the current non-collaborative case and the establishment of satellite locations (UCCs) to consolidate last-mile deliveries suggest potential savings of nearly 40%.

Various potential problem extensions can be defined to extend this work. The experimental setting could be made more realistic by considering UCC opening costs, which are not accounted for in this work. Likewise, the effect of vehicle safety capacities could be investigated. From the aspect of customer modelling, a more extensive analysis of different demand variance levels and simulation results

regarding standard deviations or different quartiles for a closer risk analysis could be completed. Furthermore, our solving methodology could be extended to include further input uncertainty associated with travel times or customers. Even dynamic inputs could be considered by combining our algorithm with machine-learning techniques.

Acknowledgements

This work is partially supported by European Union's Horizon 2020 research and innovation programme within the U-TURN project under Grants No. 635773. All data used for the experiments was provided by ELTRUN E-Business Research Centre of the Athens University of Economics and Business (AUEB) and OPTILOG. The authors are thankful with AUEB and OPTILOG for conducting several interviews, esp. with the EEL Working Group participants, and for sharing the data sets gathered for further research activities. Also, this work has been partially supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (TRA2013-48180-C3-P, TRA2015-71883-REDT), FEDER, the doctoral grant of the UOC, and the Erasmus+ programme (2016-1-ES01-KA108-023465).

References

- Cattaruzza, D.; Absi, N.; Feillet, D.; Gonzalez-Feliu, J.: Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics* 6 (2015) 1, pp. 1-29.
- Clarke, G.; Wright, J.: Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* 12 (1964) 4, pp. 568-581.
- Cuda, R.; Guastaroba, G.; Speranza, M. G.: A survey on two echelon routing problems. *Computers & Operations Research* 55 (2015) C, pp. 185-199.
- Dalfard, V. M.; Kaveh, M.; Nosratian, N. E.: Two meta-heuristic algorithms for two-echelon location-routing problem with vehicle fleet capacity and maximum route length constraints. *Neural Computing & Applications* 23 (2013) 7/8, pp. 2341-2349.
- Drexel, M.; Schneider, M.: A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research* 241 (2015) 2, pp. 283-308.
- Juan, A. A.; Faulin, J.; Ferrer, A.; Lourenco, H.: MIRHA: multi-start biased randomization of heuristics with adaptive local search for solving non-smooth routing problems. *TOP* 21 (2013) 1, pp. 109-132.
- Juan, A. A.; Faulin, J.; Grasman, S. E.; Rabe, M.; Figueira, G.: A review of simheuristics: extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems. *Operations Research Perspectives* 2 (2015), pp. 62-72.
- Leitner, R.; Meizer, F.; Prochazka, M.; Sihm, W.: Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4 (2011) 3, pp. 332-337.
- Mehrjerdi, Y. Z.; Nadizadeh, A.: Using greedy clustering method to solve capacitated location routing problem with fuzzy demands. *European Journal of Operational Research*, 229 (2013) 1, pp.75-84.

- Mehrjerdi, Y. Z.; Nadizadeh, A.: Heuristic method to solve capacitated location-routing problem with fuzzy demands. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 27 (2016) 1, pp. 1-18.
- Nguyen, V.-P.; Prins, C.; Prodhon, C.: Solving the two-echelon location routing problem by a {GRASP} reinforced by a learning process and path relinking. *European Journal of Operational Research* 216 (2012) 1, pp. 113-126.
- Prodhon, C.; Prins, C.: A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research* 238 (2014) 1, pp. 1-17.
- Pomponi, F.; Fratocchi, L.; Tafuri, S. R.: Trust development and horizontal collaboration in logistics: a theory based evolutionary framework. *Supply Chain Management: An International Journal* 20 (2015) 1, pp. 83-97.
- Quintero-Araujo, C. L.; Caballero-Villalobos, J. P.; Juan, A. A.; Montoya-Torres, J. R.: A biased-randomized metaheuristic for the capacitated location routing problem. *International Transactions in Operational Research* (2016).
- Rahmani, Y.; Cherif-Khettaf W. R.; Oulamara, A.: A Local search approach for the Two-Echelon Multi-products Location-Routing problem with pickup and delivery. *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015) 3, pp. 193-199.
- Rahmani, Y.; Cherif-Khettaf W. R.; Oulamara, A.: The two-echelon multi-products location-routing problem with pickup and delivery: formulation and heuristic approaches, *International Journal of Production Research*, 54 (2016) 4, pp. 999-1019.
- Savelsbergh, M.; van Woensel, T.: 50th Anniversary invited article—city logistics: challenges and opportunities. *Transportation Science* 50 (2016) 2, pp. 579-590.
- Taniguchi, R.; Thompson, R.G.; Yamada, T.: Recent trends and innovations in modelling city logistics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 125 (2014) 2, pp. 4–14.
- Vidović, M.; Ratković, B.; Bjelić, N.; Popović, D.: A two-echelon location-routing model for designing recycling logistics networks with profit: MILP and heuristic approach. *Expert Systems Applications* 51 (2016), pp. 34-48.

Simulation-based Optimization for a Supply Chain with Load Bundling Opportunity

Simulationsbasierte Optimierung in Liefernetzwerken mit gebündeltem Gütertransport

Thomas Felberbauer, FH St. Pölten, St. Pölten (Austria),
thomas.felberbauer@fhstp.ac.at

Andreas Josef Peirleitner, Klaus Altendorfer, FH Steyr, Steyr (Austria),
andreas.peirleitner@fh-steyr.at, klaus.altendorfer@fh-steyr.at

Abstract: For a multi-stage, multi-item supply chain the optimal inventory management parameters reorder point and lot size are investigated using a simulation based optimization approach. The optimization approach consists of a simulation model and a metaheuristic search procedure, which is a subclass of evolutionary algorithm. For the evaluation of the load bundling opportunity in different demand structures, the Pareto frontiers of the multi-criterial objective function, i.e. service level and inventory costs, are discussed. The paper shows that the load bundling opportunity has significant cost and environmental benefits compared to the situation without this opportunity. This potential increases with the number of products. Finally, results show that for a service level value of $\eta = 0.95$ the ABC clustered demand scenario leads to 34.1 % lower supply chain costs than the constant demand scenario.

1 Introduction

According to Chopra und Meindl (2007) and Pazhani et al. (2016) inventory, transportation and sourcing are the main cost drivers in a supply chain. Therefore, minimizing transportation costs in supply chain management is an important issue. Transportation related costs are either directly caused, by transportation and material handling or indirectly caused, by inventory holding. Also from an environmental perspective green supply chain management yields to reduce CO₂ emission by efficient transportation strategies. Nevertheless, according to Sarraj et al. (2013) the way physical objects are moved, stored, realized, supplied and used is still economically, environmentally and socially inefficient and unsustainable. Quantitative results confirm their former statement, illustrating that the average of weight-volume capacity is only 60 %, and 25 % of trucks travel empty. Load bundling, which means that different items are loaded on the same truck, is a transportation

strategy with the aim of high truck utilization and one-step to efficient transportation.

Available inventory management literature shows that supply chain optimization usually focusses on optimal lot sizes and re-order policies assuming stochastic demand and static order costs (Shah 2009; Tamjidzad und Mirmohammadi 2015; Kouki et al. 2015; Stadler 2015). However, using an efficient transportation mode, where different items are transported on the same truck (i.e. load bundling), order costs per item are no more fix and, therefore, classical integrated inventory and supply chain optimization models need to be extended. In a recent paper, Peirleitner et al. (2016) present a simulation framework to optimize the lot size and reorder points of a three stage supply chain applying an integrated metaheuristic and simulation-based solution approach. The framework presented in Peirleitner et al. (2016) also enables the discussion of real world transportation effects and shows first results concerning the load bundling opportunity. The former paper gives first insights that the bundling of items for transportation can lead to significant cost reductions. However, an in depth analysis of the item and demand structure effects within the supply chain is left for further research and is still a research gap.

In the proposed paper, the recently published framework of Peirleitner et al. (2016) is extended to study the effect of different demand scenarios on the effectiveness of load bundling in supply chain transportation. Whereas the discussion of different demand scenarios is neglected in the former work in the new numerical study, two demand parameters, i.e. the number of items and the demand distribution are varied. In detail, two different empirical demand distributions are tested: (1) each item has the same order rate; (2) a ABC clustered order rate, where 20 % of items, i.e. cluster A, lead to 75 % of overall order rate, 20 % of items, i.e. cluster B, lead to 20 % order rate and 60 % of items, i.e. cluster C, lead to 10 % order rate. Additional to the above-mentioned order demand distributions also the number of products is varied and analysed.

In this paper, the following three research questions are addressed using the simulation based optimization approach.

- RQ1: What is the impact of load bundling on the overall carbon emission (CO₂) generated by transportation in a multi-stage supply chain?
- RQ2: How does the number of items effect the cost benefit of load bundling in a multi-stage supply chain?
- RQ3: How is the load bundling benefit related to the two specific demand distributions?

The remainder of the paper is organized as follows. In Section 2, the investigated supply chain is presented and the model / problem specifications are discussed for each supply chain member. Additionally, the simulation and optimization framework is introduced in this section. In Section 3, the experimental design and the numerical study are presented. The results for integrated supply chain management and inventory management with load bundling are discussed in Section 4. Finally, in Section 5, the paper contribution is summarized and some perspectives for future research are mentioned.

2 Problem description

Figure 1 shows the multi-stage and multi-item supply chain. The investigated supply chain structure and the reorder logic of the supply chain members is modelled using the simulation software AnyLogic©. The supply chain consists of a manufacturer m , a distribution centre d and several retailers r with the opportunity of load bundling between each supply chain member. The objective is to minimize inventory and order costs while maximizing service level η for retailers, which leads to a bi-objective optimization problem. Note that in the model no backorder costs are calculated within the cost function. Therefore, service level η is considered as key performance indicator for the supply performance and is integrated in the bi-objective optimization problem. For the calculation of overall costs C cost components are summarized over all supply chain members, whereas the service level η , i.e. item availability to the customer, is only evaluated for retailers that deliver their goods to customers.

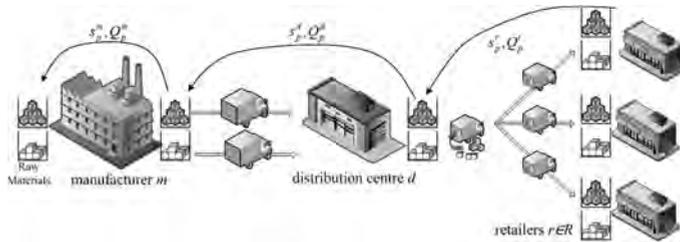


Figure 1: Multi-item, multi-stage supply chain

The applied inventory management system for each of $p \in P$ product of all supply chain members is the (s, Q) -policy. The critical decisions variables for this inventory system are reorder point s and lot size Q for each product p at each supply chain member. According to basic literature (Axsäter 2015) the influence of reorder point s and lot size Q on inventory and service performance for streamlined systems is known. A high reorder point s reduces tardiness and simultaneously increases service level η , but also increases inventory costs. An increase of the lot size Q leads to fewer orders and order costs, but increase inventory costs too.

The retailers $r \in R$ sale P different products to the anonymous customers, which require immediate delivery. If product p is not available for the customer at the retailer, the order is backlogged and service level is zero for this specific order. Once the echelon stock, i.e. the physical on hand inventory plus the orders in progress minus the backlog, drops below the reorder point s_p^r , the retailer orders lot size Q_p^r from the distribution centre d . When lot size Q_p^r is larger than the maximum truck load, it is split into $\lceil Q_p^r / \text{maximum-truckload} \rceil$ trucks. The same reorder logic is applied between distribution centre and manufacturer.

When the inventory falls below the replenishment point s_p^r we assume a static one day order processing time between retailer and distribution centre. After this time, the order of lot size Q_p^r for the specific product is packed requiring a stochastic packing time b^d at the distribution centre and transported with random distance

depended delivery time t_t^r to the Retailer r . The product independent expected replenishment lead time L^r is defined as the sum of the static order processing time, the expected packing time b^d as well as the expected transportation time t^r . Note that for distances between retailers r and the distribution centre we use different values. This leads to different expected values $E[t^r]$ for the delivery times. The order costs for retailers r and the distribution centre d , i.e. c_s^r and c_s^d respectively, are the sum of transportation costs and packing costs. The replenishment lead time for the orders of the distribution centre L^d is the sum of the random packing time at the manufacturer b^m and a random transportation time to the distribution centre t^d . For the manufacturer m , cleaning costs c_s^m occur whenever two orders of lot size Q are produced after each other. The production system of the manufacturer m has one machine, where all the products p are produced. Additionally, we assume that raw materials are always available. The replenishment lead time at the Manufacturer L^m consists of processing and waiting time of the single-stage manufacturing system.

The load bundling opportunity offers the chance that different products are transported simultaneously in the same truck. In detail, the load bundling for the transport between retailer and distribution centre as well as between distribution centre and manufacturer is modelled as follows: If the lot size of the retailer Q_p^r does not utilize the truck to 100 %, the truck waits up to a specific truck waiting time t_w to be filled with further orders for the same retailer. The truck waiting time t_w is also an optimization parameter within our studies.

3 Numerical Study

The studied supply chain consists of one manufacturer m , one distribution centre d and six retailers r . Each retailer r offers P different products with overall order arrival rate $\lambda^r=100$ pcs/day, i.e. the sum of all product order rates. The inter-arrival times of each product p follow an exponential distribution. After the simulation run all customer orders that cannot be fulfilled reduce the overall service level η . The distances between the retailer and the distribution centre d are 30 km for retailers $r \in \{1,2,3\}$, 60 km for retailers $r \in \{4,5\}$, and 120 km for retailer $r \in \{6\}$. The distance between manufacturer m and distribution centre d is 50 km. The packing time at the distribution centre b^d and for the manufacturer b^m are triangular distributed with min, max and mode of $\{1, 3, 5\}$ hours respectively. Before we start with the packing at distribution centre or manufacturer we assume a static order processing time of one day. The random transportation times $t=\alpha+T$ are the sum of a fix $\{\alpha^d, \alpha^r\}$ value, i.e. the minimum time it takes without any disturbances, and an exponential distributed random part $\{T^d, T^r\}$ implementing the possible disturbances in the transportation process. Note that all transportation times are distance dependent. For the transportation time t^d from manufacturer to the distribution centre $\alpha^d = 0.125$ days and $E[T^d] = 0.03125$ days. The transportation time t^r of the nearest retailers with distance of 30 km, i.e. $r \in \{1,2,3\}$, have $\alpha^r = 0.075$ and $E[T^r] = 0.19$ days. The next 2 retailers, i.e. $r \in \{4,5\}$, with medium distance of 60 km have a constant transportation time of $\alpha^r = 0.15$ days and an exponential part $E[T^r] = 0.0375$ days. Finally, retailer $r=6$ which has the longest distance of 120 km has a transportation time of $\alpha^r = 0.3$ and $E[T^r] = 0.075$ days. For the transportation, we assume an average truck speed of 50 km/h and two different truck types. The first truck type,

which is responsible for the transportation between distribution centre and retailers, has a maximum truckload of 18 pallets and a maximum truck weight of 12 tons. The second truck type, which drives between manufacturer and retailer, has maximum truckload of 34 pallets and a maximum truck weight of 22.66 tons. For the calculation of the CO₂ emissions we refer to Sarraj et al. (2013) and use their weight dependent equation. For the calculation of the transportation costs, we use the unit cost of truck transportation, which is 1.385 currency units per km (CU/km).

The inventory costs are $c_h^m = 0.05$ CU/day, $c_h^d = 0.1$ CU/day, and $c_h^r = 0.2$ CU/day (equal for all retailers r). Packing costs c_s^r for the retailers r and the distribution centre d , i.e. c_s^d , are 20 CU per order. Cleaning cost at the manufacturer are $c_s^m = 100$ CU per order. The setup times per lot at the machine are 0.49 hours and processing time per piece is 0.012 hours leading to a planned utilization of 97.5 % with an optimal lot size Q_p^m calculated according to the EOQ equation. For the simulation studies a simulation time of 1250 days is used, whereby 250 days are used as warm up time. Each iteration is evaluated within the simulation model using 20 replications.

Table 1: Parameter independent of scenario

Description	Value
Overall order arrival rate λ^r per retailer r	100 pcs/day
Transportation time t^r from distribution center to retailer r	$t^r = \alpha^r + T^r$ hours
Transportation time t^d from manufacturer to distribution center	$t^d = \alpha^d + T^d$ hour
Min, max and mode for the triangular distributed packing time at the distribution centre b^d and the manufacturer b^m	{1,5,3} hours
Weight dependent carbon emission per km	$(0.772 + (\text{truck weight}) * 0.013)$ kg CO ₂ /km*
Order processing time	1 day
Holding costs for retailer c_h^r , distribution centre c_h^d , and manufacturer c_h^m	{0.2, 0.1, 0.05} CU/day
Unit cost of truck transport	1.385 CU/km*
Maximum truckload for distribution center and manufacturer	18 / 34 pallets
Maximum truck weight for distribution center and manufacturer	12 / 22.66 tons
Packing costs of retailer c_s^r and distribution centre c_s^d	20 CU per order
Cleaning costs c_s^m at the manufacturer	100 CU per order

*Parameter values rely on Sarraj et al. (2013).

To answer the research questions stated in the introduction, Table 2 shows the scenario depend parameter values that are varied in this simulation study. In this paper, we differ between scenarios, with and without load bundling of products. For the constant demand distribution, the order rate per retailer and product is defined with $\lambda_p^r = \frac{\lambda^r}{P}$. For a scenario where the number of products P is 10 applying the overall arrival rate $\lambda^r = 100$ pcs/day leads to the arrival rate $\lambda_p^r = 10$ pcs/day for all products. For the ABC clustered demand distribution the tuple $\tau = \{(20\%, 75\%), (20\%, 15\%), (60\%, 10\%)\}$ is introduced. The tuple describes the combination of the relative number of products and the respective relative demand. According to τ the investigated ABC clustered demand distribution, i.e. 20 % of products lead to 75 % of demand, the next 20 % of products lead to 15 % of demand and finally the last 60 % of products lead to 10 % of demand is defined. Assuming a scenario where the number of products P is 10 and applying the overall arrival rate $\lambda^r = 100$ pcs/day the arrival rate λ_p^r for products $p \in \{1, 2\}$ is 37.5 pcs/day, the arrival rate for products $p \in \{3, 4\}$ is 7.5 pcs/day and the arrival rate for products $p \in \{5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ is 7.5 pcs/day.

Table 2: Scenario specific parameter

Description	Value
Transportation mode	no load bundling, load bundling
Number of products P	{5,10,20}
Demand distribution	constant, ABC clustered order rate

For the optimization procedure, the simulation model is connected to the (meta-) heuristic optimization framework HeuristicLab, which is a tool where different metaheuristic search concepts, such as evolutionary algorithms, are implemented. The tools can be connected with a simulation software by the use of an external evaluation problem (Beham et al. 2012). In this study the problem is bi-objective, therefore a Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is used. The chosen algorithm creates the parameter set and sends them to the simulation model for evaluation. The simulation model returns the performance measures, i.e. overall costs C and service level η to HeuristicLab. In some preliminary studies we identify the following parameterization of the NSGA-II: population size is 100, selected parents are 400, crossover probability is 90 %, and a mutation probability is 5 % (Peirleitner et al. 2016). For the crossover operator MultiRealVectorCrossover is used which randomly selects different crossover methods applicable for solutions encoded as real vectors. Additionally, a MultiRealVectorManipulator is used for the mutation of the solution parameter vectors.

4 Results

In this section, the research questions stated in the introduction are addressed as follows. Subsection 4.1 discusses the cost improvement effect of load bundling and its impact on CO₂ emissions, i.e. RQ1. Subsection 4.2 evaluates how the cost benefit generated due to load bundling is effected by the number of products and therefore

investigates RQ2. The influence of ABC clustered item demand on the cost benefit of load bundling is addresses in subsection 4.3, which provides insights on RQ3.

4.1 Load Bundling Effect on Costs and CO₂ Emissions

To identify the potential of load bundling, firstly, a basic benchmark scenario is analysed without the load bundling opportunity. For scenarios with and without load bundling the number of products $P = 10$ and the demand distribution is constant, which lead to an order rate of $\lambda_p^r = 10$ pcs/day. Note that also for the scenario without load bundling the replenishment parameters lot size Q and reorder point s are optimized. Figure 2 shows the results of this basic scenario in comparison to the results when load bundling is allowed. Note that for the load bundling scenario, we also identify the optimal truck waiting time.

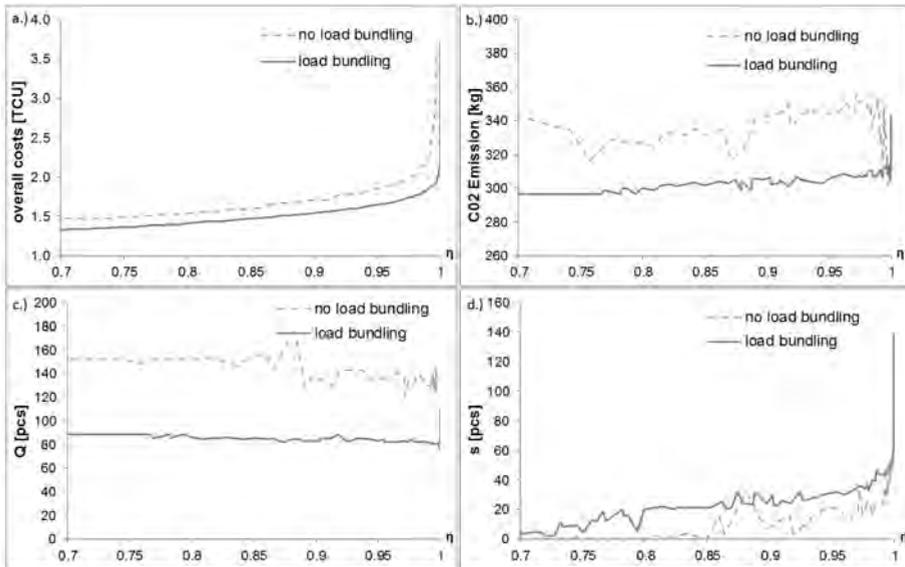


Figure 2: Basic scenario improvement potential with load bundling

Figure 2a shows the Pareto frontier of the performance measures service level and overall cost. The minimal overall costs on the y-axis are depicted for the respective service level value ($0.75 \leq \eta \leq 1$) on the x-axis. The chart shows that the load bundling opportunity leads to significantly lower costs. For a common service level target value of $\eta = 0.95$ the overall costs of the supply chain can be decreased by 12.8 %. Addressing the CO₂ emissions from transportation in the studied supply chain, Figure 2b (where the overall CO₂ emission per day is visualized) shows that the load bundling strategy leads to an average CO₂ decrease of approximately 10 %. An interesting finding is that despite CO₂ reduction also the lot sizes Q can be nearly bisected (see Figure 2c for the optimal lot sizes at the retailer $r = 6$). Intuitively the lot size reduction would lead to more truck tours. Nevertheless, the study shows that the bundling of products outweighs the higher number of orders. The reorder point s increases with the load bundling opportunity see Figure 2d showing the reorder

point at the retailer $r = 6$). The reason for this is that due to the implemented truck waiting time the mean replenishment lead time increases with load bundling. Therefore, the demand within replenishment also increases and more inventory is needed to deliver in time.

4.2 Investigation of the Number of Products on the Load Bundling Effect

In this scenario, we vary the number of products $P \in \{5, 10, 20\}$ and analyse how the number of products effects the cost improvement with load bundling. For the charts with $P = 10$ we refer to Figure 2a (overall costs with respect to service level) and 2c (lot size w.r.t. service level).

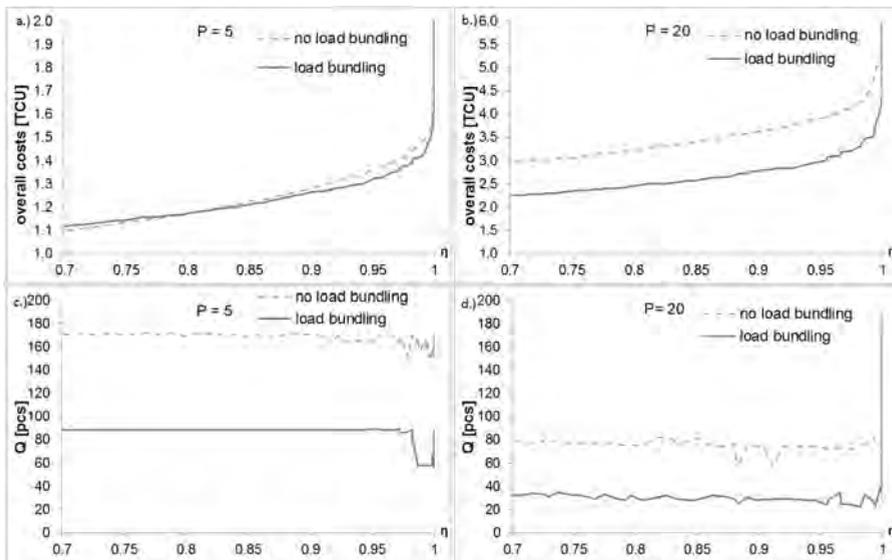


Figure 3: Optimal costs and lot size with respect to the number of products

Figure 3a and Figure 3c show the benefit of load bundling with respect to the number of products P . Analysing a service level value of $\eta = 0.95$, the study shows for $p=5$ only marginal changes (2 %) in overall costs. An increase of the number of products to $p=10 / p=20$ identifies an overall supply chain costs benefit of 12.8 % and 22.9 %, respectively. The higher number of products leads to a higher number of smaller orders and a lower truck load utilization for the basic scenario without load bundling. Therefore, the benefit of load bundling increases with respect to the number of products. Figure 3c, 2c and 3d shows that in all scenarios load bundling leads to smaller lot sizes (shown for retailer $r = 6$). We find that a fourfold increase of the number of products (compare Figure 3c with 3d), which lead to a quarter in demand per product λ_p^r , lead to approximate halved lot sizes. This finding is in line with literature (Axsäter 2015) where the optimal EOQ lot size decreases with respect to the square root of the demand rate.

4.3 Influence of the two different demand distributions

In this scenario, the influence of the two proposed demand distributions is investigated again related to the number of products (i.e. $p \in \{5, 10, 20\}$). Figure 4 shows the Pareto frontier of cost and service level with constant and ABC clustered demand for different number of products. The results of Figure 4a and Figure 4b show that for a low number of products the demand distribution has no ($P = 5$) or only very low ($P = 10$) effect on the overall costs and leads to very similar Pareto frontiers. However, for a higher number of products (i.e. $P = 20$) a significant cost effect can be observed. The ABC clustered demand scenario leads to significantly lower costs which is an interesting managerial insight. For a service level value of $\eta = 0.95$, the overall costs for the ABC clustered demand are 34.1 % below the costs of the constant demand. The specific simulation results (which are not reported here) indicate that in the ABC clustered demand situation, the A products are delivered in full or half truck load, while the B and C products apply a lot size optimization which seems to be independent of the truck load. Specifically, the C product behaviour can be interpreted as using the remaining truck load capacities for transportation. We assume that real supply chain settings usually consist of a lot more products, which often have demand distributions similar to the ABC clustered demand in this study. Therefore, the results indicate a very high cost reduction potential due to load bundling in real world load applications.

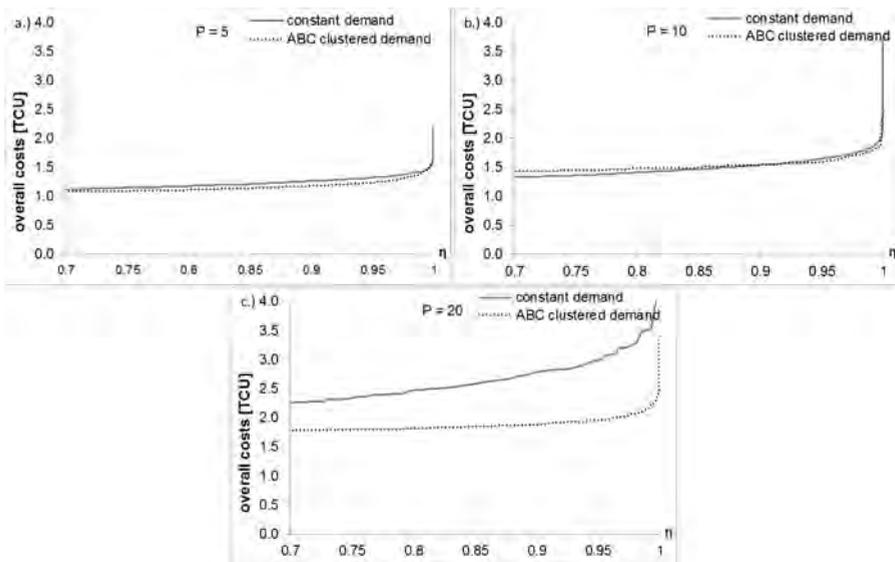


Figure 4: Overall costs and service level for constant and ABC clustered demand

5 Conclusion

In this paper a multi-stage, multi-item supply chain is investigated. For the supply chain partners, i.e. a manufacturer, a distribution center and 6 retailers, the optimal reorder parameters for lot size Q and reorder point s are identified analysing two different demand distributions. We found that the load bundling opportunity leads to

significant cost improvements. The study shows that for a service level value of 95 % costs are 12 % lower with the load bundling opportunity in a setting with 10 products. Additionally, despite a reduction of lot sizes, the CO₂ emissions can be reduced by 10 % when load bundling is applied. Furthermore, an increase of the cost reduction potential with higher number of products is identified. For the comparison of different demand distributions, we found that the ABC clustered demand leads to significantly lower costs for the scenario with a high number of products.

For further research, other supply chain structures, real size problem instances and further replenishment policies could be studied. Additionally, the green supply chain objective of reducing CO₂ emissions could be included in the parameter optimization and the effect of taxes on CO₂ emissions on the optimal replenishment policies could be identified.

References

- Axsäter, S.: Inventory control. Third edition. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- Beham, A.; Pitzer, E.; Wagner, S.; Affenzeller, M.; Altendorfer, K.; Felberbauer, T.; Bäck, M.: Integration of flexible interfaces in optimization software frameworks for simulation-based optimization. In: Soule, T. (Ed.): Proceedings of the fourteenth international conference on Genetic and evolutionary computation conference companion. New York: ACM 2012, pp. 125-132.
- Chopra, S.; Meindl, P.: Supply chain management. Strategy, planning, and operation. 3rd ed., Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall 2007.
- Kouki, C.; Jemaï, Z.; Minner, S.: A lost sales (r, Q) inventory control model for perishables with fixed lifetime and lead time. *International Journal of Production Economics* 168 (2015), pp. 143-157.
- Pazhani, S.; Ventura, J.A.; Mendoza, A.: A serial inventory system with supplier selection and order quantity allocation considering transportation costs. *Applied Mathematical Modelling* 40 (2016) 1, pp. 612-634.
- Peirleitner, A.J.; Altendorfer, K.; Felberbauer, T.: A simulation approach for multistage supply chain optimization to analyze real world transportation effects. In: Roeder, T. M. K.; Frazier, P. I.; Szechtman, R.; Zhou, E., Huschka, T.; Chick, S. E. (Eds.): Proceedings of the Winter Simulation Conference. Washington, DC, USA 2016, pp. 2272-2283.
- Sarraj, R.; Ballot, E.; Pan, S.; Hakimi, D.; Montreuil, B.: Interconnected logistic networks and protocols. Simulation-based efficiency assessment. *International Journal of Production Research* 52 (2013) 11, pp. 3185-3208.
- Shah, J.: Supply chain management. Text and cases. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Education 2009.
- Stadtler, H.: Supply Chain Management. An Overview. In: Stadtler, H.; Kilger, C.; und Meyr, H. (Eds.): Supply chain management and advanced planning. Concepts, models, software and case studies. 5th ed., Berlin: Springer 2015, pp. 3-28.
- Tamjidzad, S.; Mirmohammadi, S.H.: An optimal (r, Q) policy in a stochastic inventory system with all-units quantity discount and limited sharable resource. *European Journal of Operational Research* 247 (2015) 1, pp. 93-100.

A Location Model for Dynamic Vehicle Routing Problems

Ein Ortsmodell für dynamische Fahrzeugwegesucheprobleme

Thomas Mayer, Tobias Uhlig, Oliver Rose, Universität der Bundeswehr München,
Neubiberg (Germany), thomas.mayer@unibw.de, tobias.uhlig@unibw.de,
oliver.rose@unibw.de

Abstract: Multi-constrained Vehicle Routing Problems (VRP) are gaining in interest. Especially the dynamic version of the problem gets more emphasis, due to modern service requirements, like short-term or express delivery. Current models reflect the dynamism of a problem by simply considering the number of dynamic requests. A more feature-rich model for the dynamism in Dynamic Vehicle Routing Problems (DVRP) would allow an improved design and a better comparison of optimization algorithms. Additionally, a more problem instance specific algorithm selection would be possible. This paper introduces a model for the location of dynamic requests in a DVRP, the Location-based Degree of Dynamism (LDOD). Each dynamic request in every problem variant has inherently a location. Our experiments show a positive correlation between the proposed LDOD and the resulting DVRP solution quality. We conclude the paper with a general discussion and a broad outlook on our research.

1 Introduction and Related Work

We order goods over the internet and our daily groceries are hopefully delivered fast and freshly to our doorstep. We share cars and use various transportation systems. We plan our trips with navigation applications and expect what we need to be in stock in the nearest supermarket. To provide all these services, complex Vehicle Routing Problems (VRPs) with several constraints have to be managed and solved. The VRP was first introduced by Dantzig and Ramser (1959) and has been studied extensively over decades. Due to the expansion of short-time and express services, especially the dynamic version of the problem is gaining in interest. If not all customer requests are known in advance, the problem is defined as a Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP), see, for example, the taxonomy introduced in Lahyani et al. (2015). Figure 1 illustrates an example of a dynamic vehicle routing. The DVRP is first introduced in Wilson and Colvin (1977) as an extension of the VRP, with a description of a computer controlled Dial-A-Ride system in Rochester, NY (USA). The software handling this demand-oriented public transportation system has to schedule customer requests to available vehicles continuously during the day.

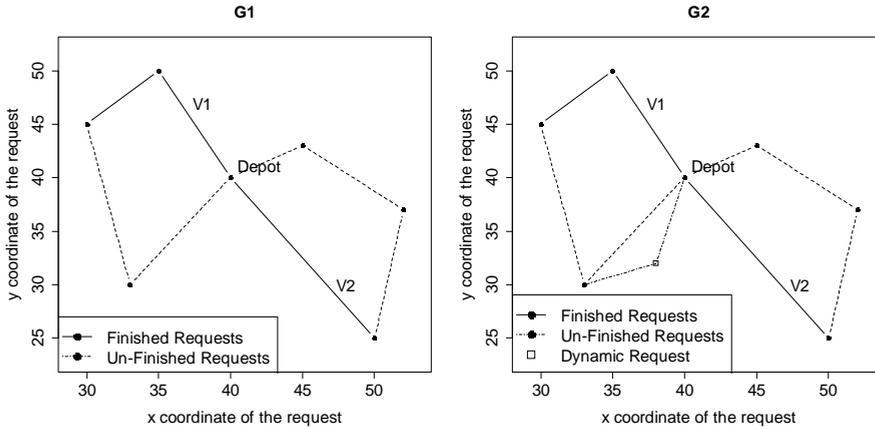


Figure 1: Graph $G1$ shows a visualization of a VRP at a time $t_i > 0$. In $G2$ a dynamic request occurs at time t_i and planned routes have to be reorganized to satisfy the additional request.

Since the late 70s, considerable research has considered the dynamism in vehicle routing. Pillac et al. (2013), and Psaraftis et al. (2016) describe an explosion in related papers after the year 2000. Despite the intense research in this area, Ritzinger et al. (2016) describe a research gap with respect to comparability of results and employed approaches. Our long term research intention is to participate in closing this gap by developing a DVRP model instance generator to support the evaluation of algorithms solving the DVRP with simulation approaches. Generated model instances could be executed for example with the open-source discrete event simulator for rich vehicle routing problems (RVRP Simulator) introduced in Mayer et al. (2016). We would like to establish simulation as a methodology to investigate, evaluate, and solve DVRPs. To this end, we need to develop a deep understanding of the nature of dynamic requests in routing problems to be able to generate and compare instances, and respectively to be able to develop and compare solution approaches.

1.1 Dynamism in a Routing System

Early work capturing the dynamic effects in a routing system was done by Lund et al. (1996). They introduce the Degree of Dynamism (DOD) as shown in Equation 1, a measure of the dynamism of a routing problem.

$$DOD = \frac{n_{imm}}{n_{tot}} \quad (1)$$

The DOD describes the ratio between dynamic requests, n_{imm} , and total requests n_{tot} , where the total requests are the sum of dynamic and static requests. Larsen (2000) extended the DOD by including the aspect of time. He introduced the Effective Degree of Dynamism (EDOD) as shown in Equation 2, which considers the planning horizon T for the calculation of the measure of the dynamism of a routing problem. The EDOD allows the modelling of the dynamic arrival times.

$$EDOD = \frac{\sum_{i=1}^{n_{imm}} \frac{t_i}{T}}{n_{tot}} \quad (2)$$

The EDOD allows the modelling of the dynamic arrival times. Larsen (2000) also introduces the Effective Degree of Dynamism with Time Windows (EDOD-TW), which considers the reaction time r_i . The reaction time is defined as time between the occurrence of the dynamic request t_i and the latest possible time the service should begin, l_i . As discussed before, the number and the arrival time of dynamic requests within the planning horizon is essential to describe the dynamism of a routing system (Larsen 2000). However, Mendoza et al. (2014) consider amongst others the parameters shown in Table 1 for a static request in their open-source VRP model, named VRP REP Model. We assume that the mentioned parameters should also be considered for the description of the dynamism in a routing system that has any dynamic requests. First considerations in this direction are given by Larsen et al. (2007). They suggest that future research should also expand the degree of dynamism measure by including the service time and the demand size.

Table 1: Extraction of parameters with description, defined for the static request of a VRP in the VRP REP Model from Mendoza et al. (2014). Dynamic requests are not part of the VRP REP Model. Additional Parameters to be considered by the description of the dynamism are also listed.

Parameters from VRP REP Model	
Node	The location of the request.
Service Time	The expected service time
Quantity	The amount/capacity/size of the demand
Skill	Skills needed to handle the request
Resource	Resources needed to handle the request
Dimension	The dimension of the demand
Additional Parameters to consider	
Weight	The weight of the demand

The parameters listed in Table 1 are mostly problem instance specific. Most of the studied VRP instances, for example, do not consider skills or resources needed to service a certain request. The dimension and weight of transported goods are often neglected, too. Independently from more specific problem instance characteristics, each dynamic request has at least a given time and location. This property is summarized in the following lemma.

Lemma of minimum characteristics of a dynamic request in a DVRP: A dynamic event in a DVRP has at least the characteristics time and location.

We assume that in addition to the amount of dynamic requests both described inherent characteristics of a dynamic request influence the solution quality of a DVRP. For the static VRP with no capacity constraints, the Travelling Salesman Problem (TSP), the variance of the distance matrix correlates with the difficulty of the problem

(Cheeseman et al. 1991;Ridge and Kudenko 2007). Influences of other TSP meta-data for the problem difficulty is investigated in Smith-Miles et al. (2010).

The number of dynamic requests is modelled with the help of the DOD; the time of occurrence is described with the EDOD. But as far as we know, there is currently no model of the third most basic characteristic of a dynamic request, the location where the request occurs in the context of a DVRP. Therefore, this paper focuses on the location of a dynamic request. In Section 2 we introduce a location model and show how our location model is correlated to the DOD. Section 3 discusses the experimental design by introducing the DVRP instance generation and solving process considering the introduced lemma. In Section 4 we present the results of our experiments and we show that there is a statistically significant positive correlation between the solution quality and our location model. Our paper concludes with a discussion of our results, and the impacts of time and employed heuristics on the solution quality. We also provide an outlook of our future research.

2 The Location-based Degree of Dynamism

We introduce the Location-based Degree of Dynamism (LDOD) as a model for the locations of the dynamic requests in the context of a DVRP. The calculation of the degree is inspired by the data-mining algorithm called Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN), introduced in Ester et al. (1996). This algorithm clusters points by their density and separates them into the categories core, reachable, and not reachable. The calculation of the LDOD is shown in Equation 3, in which the function *distance* calculates the distance between the two points P_i and P_k .

$$LDOD = \frac{\sum_{i=1}^{n_{imm}} \sum_{k=1}^{n_{tot}} distance(P_i, P_k)}{\sum_{i=1}^{n_{tot}} \sum_{k=1}^{n_{tot}} distance(P_i, P_k)} \quad (3)$$

The scope of the LDOD is as follows: $0 \leq LDOD \leq 1$. A LDOD of 0 can only be achieved if the sum of distances between points of dynamic requests has no proportion of the overall distance between all points. This is only possible if there are no dynamic requests, meaning the DOD is 0. If the DOD is 1, all requests are dynamic requests, so the LDOD is 1 too. So the LDOD is highly dependent on the DOD. The relation between DOD and LDOD is visualized in Figure 2.

The diagram on the left shows the possible LDOD value range for a given DOD on the VRP instance CMT02 introduced in Christofides et al. (1979). The diagram on the right shows the histogram of the LDOD values for 10000 randomly generated instances with a DOD of 0.2. The diagrams show that the LDOD correlates with the DOD but there are instances with equal DOD and different LDOD. We investigated all VRP instances introduced in Christofides et al. (1979), Solomon (1987), and Uchoa et al. (2014). All instances exhibit a similar relation between LDOD and DOD.

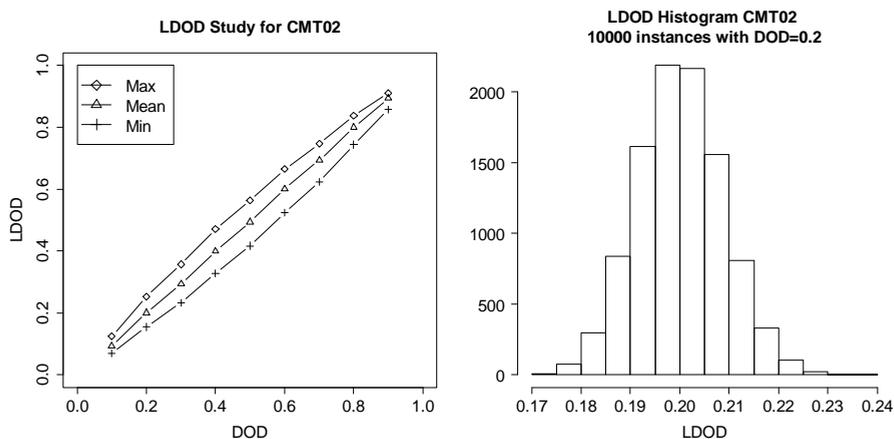


Figure 2: Relation between DOD and LDOD for the VRP instance CMT02 introduced in Christofides et al. (1979).

3 Design of Experiments

For the investigation of a possible correlation between our newly introduced LDOD, a model for the locations of dynamic requests in a DVRP and the problem solution quality, we need to create and solve DVRP instances. For this paper, we equate the solution quality with the costs of a solution which is equal to the travelled distance. Due to the lack of DVRP instances, we generated them from static VRP instances introduced in Christofides et al. (1979). We reduced these instances to TSP instances by eliminating vehicle capacity, requested quantity, and service time. Note, that we do not introduce additional requests into the problem, but instead transform some static requests into dynamic requests. The amount of dynamic requests is determined by the DOD (by default we use a value of 0.2). The VRP instance CMT13 from Christofides et al. (1979) models the most requests (120). So, for CMT13, with a DOD of 0.2, the possible number of different DVRP instances is $1.0872202 E25$ ($n_{imm} = 24$ out of $n_{tot} = 120$). We identify the instances with the minimum possible and the maximum possible LDOD. Additionally, we generate 48 randomly selected instances.

For the representation of the generated DVRP instances, we extended the VRP-REP format introduced in Mendoza et al. (2014) by including labels for dynamic requests. A DVRP consists of a set of static ($n_{tot} - n_{imm}$) and a set of dynamic (n_{imm}) requests. The routing solution for all static requests is generated with the help of the Jsprit framework, one of the most popular and powerful open-source Java frameworks for creating and solving VRP's introduced and maintained by (Schröder 2014). The determined costs for the initial solution defines the time horizon T to calculate the arrival times of the dynamic requests using the EDOD. The EDOD has a value of 0.2. The calculated arrival times t_i are evenly distributed between 0 and T to minimize any influences of the arrival times on the dynamic requests, see Equation 4. The resulting DVRP model in the VRP-REP format and the routing solution for all static requests are transformed into the RVRP Simulation Model introduced in (Mayer et al. 2016).

$$t_{i+1} - t_i = d_i; d_i = d_{i+1} \forall \text{ Request } i \quad (4)$$

The corresponding RVRP Simulator from Mayer et al. (2016) offers an interface for handling dynamic requests during the simulation. We implemented the two following dispatching algorithms.

1. Greedy: Every occurring dynamic request is added to the existing tour in a greedy way. We try to place the new request between two successive locations in the planned tour. The greedy algorithm selects the placement that leads to the minimal increase of costs. If no current tour exists, i.e., the planned tour is already completed, a new tour is generated.
2. Jsprit: Every occurring dynamic request triggers a complete re-planning of the existing tour by means of Jsprit. If no current tour exists a new tour is generated.

The experiments are performed with all 14 VRP instances introduced in Christofides et al. (1979) with both dynamic requests handling algorithms.

4 Results of Experiments

In this Section, we provide an overview on our experimental results. Example DVRP instances, generated from static instances are shown in Figure 3.

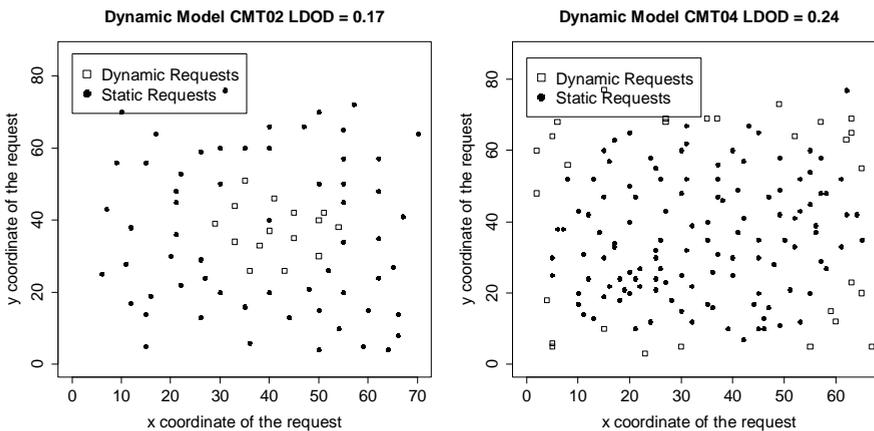


Figure 3: Generated DVRP instances. The left instance is based on CMT02 with a low LDOD. A low LDOD leads to dynamic requests within the core, compare to DBSCAN introduced in Section 2. The right instance is based on CMT04 with a high LDOD. A high LDOD leads to dynamic requests within categories reachable or not reachable, compare to DBSCAN.

Figure 3 illustrates the effect of different LDODs for a constant DOD. A low LDOD leads to dynamic requests within the category core, compare to DBSCAN introduced in Section 2. A high LDOD will pick locations from the category reachable and not reachable for the dynamic requests. Figure 4 shows an overview of the results for the instances CMT02 and CMT04. Each graph displays the relation between the solution costs on the y-axis and the LDOD on the x-axis for both implemented dispatching algorithms.

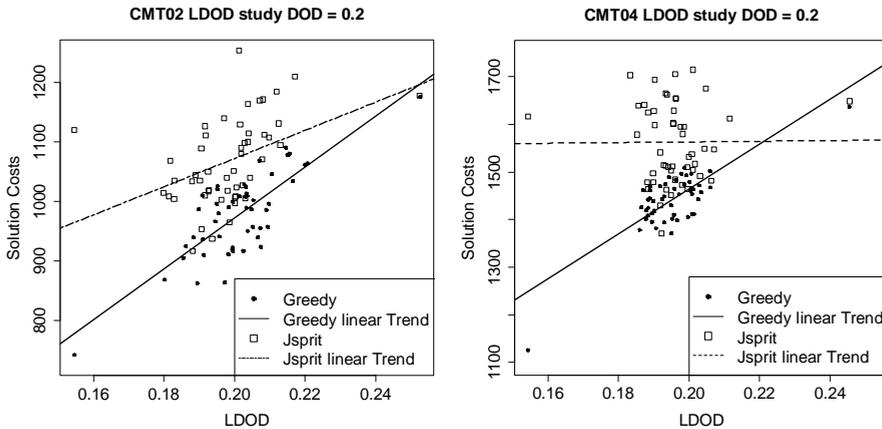


Figure 4: Visualisation of the correlation between solution costs and LDOD for the instances CMT02 and CMT04. Solution costs are determined for both instances with the Greedy and Jsprit algorithm.

Since we picked 48 dynamic realizations of the instances randomly, the values of the LDOD are varying around the value of the DOD. The calculated Spearman's rank correlation, introduced from Spearman (1904), shows a statistically significant positive correlation between the LDOD and the solution costs for close to all instances for both algorithms as indicated from the linear trend line also shown in Figure 4. For the instance CMT02, the Spearman correlation value is 0.52 for the solution with Jsprit and 0.63 for the Greedy solution. Both values are statistically significant with a p-value of less than 0.05. For the instance CMT04 the correlation value for the Greedy solutions is 0.48, also statistically significant with a p-value of less than 0.05. The Jsprit solution for the instance CMT04 is not correlated and therefore an exception among all instances. The results of this experiment are not showing any correlation although the instances are quite similar, see Figure 3.

A representation of the results for all instances is shown in Figure 5 where we normalized the solution costs for all instances. The minimum solution costs for an instance is represented by the value 0, and the highest costs are represented by the value 1. The accumulated results over all instances show a statistically significant positive correlation between LDOD and costs, independently of the algorithm. The Spearman correlation value is 0.30 for the normalized values of the costs generated by the Greedy algorithm. The correlation value for the normalized solution costs generated by Jsprit is 0.15. The results for all instances introduced in Solomon (1987) are also showing a statistically significant positive correlation between LDOD and costs, determined with the greedy algorithm. The Spearman correlation value is 0.24 for these instances. Due to time constraints, we were not able to determine cost values with the Jsprit algorithm for these instances.

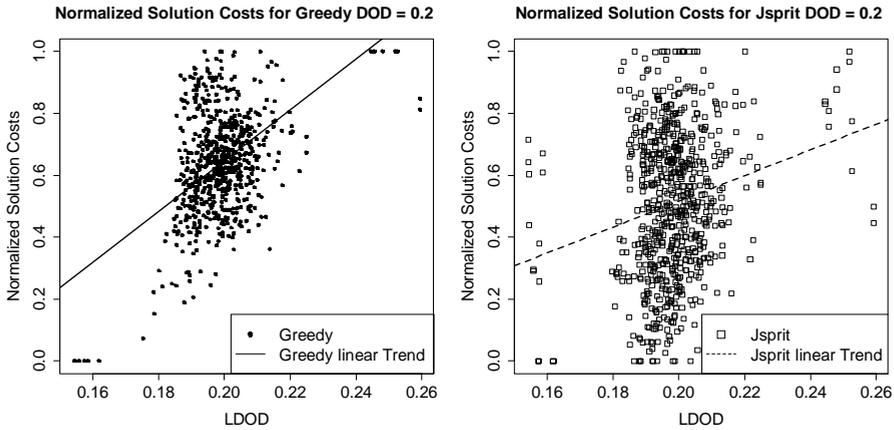


Figure 5: Visualization of the correlation between the normalized solution costs and the LDOD for all evaluated instances.

5 Discussion

In general, our research shows that there is a correlation between the solution costs of a DVRP and the locations of the dynamic requests. It seems that there is a difference in solving the problem if the dynamic requests occur close to each other, in the core area, or at the margins of the problem location space. We currently imply that higher costs are the result of a more difficult problem instance for the investigated algorithms. But maybe other algorithms behave differently. Macready and Wolpert (1996) postulate that problem instance specific characteristics determine the difficulty of an optimization problem for a particular algorithm (Smith-Miles et al. 2010). In our future research, we will investigate the correlation between solution costs and the locations of the dynamic requests for other DVRP solution approaches like Waiting & Relocation Strategies, or Dynamic Programming (Psaraftis et al. 2016), too.

Our introduced LDOD is currently not considering the variance in the location matrix of the dynamic requests and has a strong relation to the DOD. We are currently working on a location model which is independent from the DOD and which considers the variance. We think, our new model will lead to an even stronger positive correlation between the new model and the solution costs.

Our experiments also show that the solution costs are influenced by the time horizon T needed for the calculation of the EDOD, as shown in Equation 2. We additionally executed our experiments with $T_n = T * 1,5$ which lead to higher solution costs compared to the presented results with $T_n = T$. The parameter T defines the latest possible time a dynamic request can occur. We determined the parameter using the time needed to satisfy all static requests. We suspect that the parameter T is actually quite problem instance specific. We can imagine different company strategies. One strategy, for example, which only accepts dynamic requests until a certain point of time during the day. So, if all static requests are satisfied during the whole day our estimation for T is too high. On the other hand, if the static requests can be satisfied earlier during the day because dynamic requests are expected our estimation for T is too low.

Due to the time and resources consuming experiments, we only investigated the relation between solution costs and location model with a DOD value of 0.2. We expect to see also a positive correlation between location model and solution quality for higher DOD but for a final clarification we also have to perform these experiments.

What we also see is that the performance of Jsprit is worse than the performance of the Greedy algorithm. Every time a dynamic request occurs, Jsprit plans a new route beginning and ending at the current location. We were not able to configure Jsprit to not plan a complete round trip due to an unresolved Jsprit issue. This may lead to the observed performance differences. On the other side, a complete reorganization of the route at any time a dynamic request occurs may not always be the best idea in general. The complete reorganization could destroy promising routes due to changing of the direction for example. Our future investigation of models for the dynamism of DVRPs will include other algorithms as well.

6 Conclusion and Outlook

Our research shows that there is a significant positive correlation between our newly introduced LDOD, a model for the location of dynamic requests in a DVRP, and the solution quality for a constant DOD. The positive correlation is demonstrated for different DVRP solution algorithms and for different VRP instances. That means, that for example a comparison of DVRP algorithms only based on the DOD is not sufficient and could lead to wrong evaluations.

Our future research focuses on the improvement of our newly introduced LDOD by considering the variance within the dynamic request location matrix. We will also concentrate on the development of models describing other characteristics of a dynamic request influencing the dynamism of a DVRP. Our long term research goal is the generalization of the models of the dynamism for DVRP to provide high quality problem instances and to support the DVRP solution algorithm development. We think by improving the modelling of the characteristics of the dynamism in a DVRP we are able to design better solution algorithms.

References

- Cheeseman, P.; Kanefsky, B.; Taylor, WM.: Where the Really Hard Problems Are. In: Mylopoulos, J.; Reiter, R. (Eds.): Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). Sydney (Australia), 1991, pp. 331-337.
- Christofides, N.; Mingozzi, A.; Toth, P.: The vehicle routing problem. In: Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., Sandi, C. (Eds.): Combinatorial Optimization. Wiley (USA), 1979, pp. 315-338.
- Dantzig, G.; Ramser, J.: The truck dispatching problem. Management science. 1959, pp. 80-91.
- Ester, M.; Kriegel, H.P.; Sander, J.; Xu, X.: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: Simoudis, E.; Han, J.; Fayyad, U. (Eds.): Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (Kdd), Portland (USA), 1996, pp. 226-231.

- Lahyani, R.; Khemakhem, M.; Semet, F.: Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*. 2015, pp. 1-4.
- Larsen, A.; Madsen, O.: The dynamic vehicle routing problem. 2000.
- Larsen, A.; Madsen, O.; Solomon, M.: Classification of dynamic vehicle routing systems. *Dynamic Fleet Management*. 2007, pp. 19-40.
- Lund, K.; Madsen, O.; Rygaard, J.: Vehicle routing with varying degree of dynamism. 1996.
- Macready, WG.; Wolpert, D.: What makes an optimization problem hard?. *Complexity*. 1996, pp. 6-40.
- Mayer, T.; Uhlig, T.; Rose, O.: An open-source discrete event simulator for rich vehicle routing problems. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio (Brazil), 2016, pp. 1305-1310.
- Mendoza, J.; Guéret, C.; Hoskins, M.; Lobit, H.; Pillac, V.; Vidal, T.; Vigo, D.: VRP-REP: The Vehicle Routing Community Repository. Third meeting of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics Optimization (VeRoLog). Oslo (Norway). 2014, pp. 56-77.
- Pillac, V.; Gendreau, M.; Guéret, C.; Medaglia, A.: A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. 2013.
- Psaraftis, H.; Wen, M.; Kontovas, C.: Dynamic vehicle routing problems: Three decades and counting. *Networks*. 2016.
- Ridge, E.; Kudenko, D.: An analysis of problem difficulty for a class of optimisation heuristics. In: Cotta, C.; van Hemert, J. (Eds.): *European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, Valencia (Spain), 2007, pp. 198-209.
- Ritzinger, U.; Puchinger, J.; Hartl, R.: A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*. 2016.
- Schröder, S.: Jsprit Home: <http://jsprit.github.io/>. Accessed March. 01, 2016.
- Smith-Miles, K.; van Hemert, J.; Lim, X.: Understanding TSP difficulty by learning from evolved instances. In: Blum, C.; Battiti, R. (Eds.): *International Conference on Learning and Intelligent Optimization*. Venice (Italy), 2010, pp. 266-280.
- Solomon, M.: Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*. 1987.
- Spearman, C.: The proof and measurement of association between two things. *The American journal of psychology* 15.1 (1904), pp. 72-101.
- Uchoa, E.; Pecin, D.; Pessoa, A.; Poggi, M.; Vidal, T.: Subramanian A. New benchmark instances for the capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2017.
- Wilson, N.; Colvin, N.: Computer control of the Rochester dial-a-ride system. 1977.

Analysis of Decentral Platoon Planning Possibilities in Road Freight Transportation Using an Agent-based Simulation Model

Analyse dezentraler Möglichkeiten der Platoon-Planung im Straßengüterverkehr mit Hilfe einer agentenbasierten Simulation

Ralf Elbert, Jan-Karl Knigge, TU Darmstadt, Darmstadt (Germany),
elbert@log.tu-darmstadt.de, knigge@log.tu-darmstadt.de

Abstract: In this paper, a modelling approach is proposed in order to simulate platoon planning possibilities for individual trucks. An agent-based simulation model has been developed using a generic transport network with randomly generated transports between supplier and customer nodes. The model is used to analyse the inter-arrival times of trucks at sections in the network under different parameter settings. By that, potential waiting times of trucks for platooning possibilities are calculated. Furthermore, the percentage of route that can be driven as a platoon is calculated under the assumption that trucks are allowed to wait at intersections for a predefined time. Results show that the model can be used to investigate decentralized platooning possibilities and analyse the trade-off between savings generated by platooning and the cost for necessary waiting times.

1 Introduction

Wireless communication technology enables automatic exchange of data between vehicles in real time. Along with the use of distance-measuring sensors and high performance on-board computational power, this technology can be used for automated driving of trucks in so called platoons (Tsugawa et al. 2016). In such a platoon, a group of trucks automatically follows a leading vehicle. The following trucks thus do not need to be controlled by a human driver. Furthermore, the distance between vehicles can be minimized and fuel consumption caused by aerodynamic drag can be reduced (Bonnet and Fritz 2000).

A general overview and summary of platooning literature in between 1994 and 2010 can be found at Kavathekar and Chen (2011). While technological aspects of platooning are under investigation since the 1950s (Tsugawa et al. 2016; for technological research on platooning see for example Santini et al. 2017; Sugimachi et al. 2013 or Yazbeck et al. 2014), research regarding the management and planning challenges connected to platooning in road freight transportation has gained more

and more attention in recent years. This is mainly due to the fact that generating platooning possibilities requires for additional effort when planning routes and scheduling trucks (Larson et al. 2013; Larsson et al. 2015).

While the body of literature on technological aspects is rich, most research on platoon forming and planning mainly concentrates on fuel saving potentials: Liang et al. (2016) try to identify fuel-efficient collaboration opportunities between trucks. They then concentrate on efficient platoon forming manoeuvres under different traffic conditions. Algorithms for fuel-efficient platoon forming as well as breakup manoeuvres are presented in van de Hoef et al. (2015). Larsson et al. (2015) develop a theoretical framework for modelling fuel-optimal platoons and present potential solving heuristics.

In the field of platoon planning, many publications (like for example Larson et al. 2013; Liang et al. 2016; Saeednia and Menendez 2017) have in common that they deal with planning from a global perspective having all necessary information available. Larson et al. (2013) for example simulate a simplified German autobahn network with local controllers at each intersection that decide if it is more fuel-efficient for a truck to increase its speed in order to be able to form a platoon. The authors also mention the possibility of trucks driving detours so that they can form platoons. To calculate their decision, the controllers need to know each truck's position, speed and destination in real-time. However, in the context of a practical application of platooning, the question, how platoons can be planned among trucks of different owners is of great interest. From the point of view of one individual company, a scenario in which only limited information on other companies' truck movement is available appears to be more realistic as road freight carriers might be unable or unwilling to share their routing information with external planners (Bronzini and Singuluri 2009).

The relevant research gap thus lies in the investigation of possibilities on how platoons can be formed with only limited or no information available. To integrate limited information availability into platooning research, this work focuses on platooning decisions on the level of individual trucks. Without having any information on other trucks, one individual truck that wants to join a platoon can only decide whether or not it should wait at an intersection until other trucks that are ready for platooning appear. The longer one truck driver is allowed to wait during his tour, the more opportunities for platooning arise over time. The first research goal is therefore to investigate the influence of the number of trucks with platooning technology on the maximum waiting time. The second research goal lies in analysing the relation between the percentage of the entire route that can be driven as a platoon and the necessary overall waiting time of individual trucks. From an economic point of view, investigating this trade-off between savings generated by platooning and the costs for letting trucks wait is of great interest. Yet, to keep the calculation of waiting times simple, only platoons consisting of two trucks have been considered in this work.

The remainder of this work is structured as follows: First, the simulation model is described in detail. Here, especially network generation and the design of the experiments will be presented. In the subsequent chapter, the obtained results of the simulation study will be presented. Finally, this work closes with brief conclusion and an outlook for future research.

2 Simulation Model

2.1 Generic Network Generation

In order to analyse the relation between the percentage of route that can be driven in a platoon and the necessary waiting time, an agent-based simulation model has been developed. The model uses a randomly generated generic graph of cities (nodes) and connecting roads (arcs) in order to simulate inter-city road freight traffic. Network generation is based on the work of Leyton-Brown et al. (2000), who argue that using a generic network instead of a real-world network is more suitable for the investigation of systematic parameter variation.

A total number of 100 cities have been created which are laid-out randomly over an area of 1000x1000 km. This is roughly equivalent to the extent of larger central European countries and thus regarded as a realistic scale for the simulation model. Cities can either be suppliers, customers or simple intersections. Customers and suppliers were assigned randomly to these cities with a probability of 0.25 of a city being a customer and a probability of 0.3 of a city being a supplier. This configuration has led to a final share of 25 suppliers and 43 customers. The remaining 32 cities are configured as simple intersections of arcs. The setting of having between one and two customer cities per supplier has been chosen in order to generate a fairly high number of routes while only having a limited number of destination nodes. Yet, for future research, evaluating the results in networks with different customer-supplier shares might also be of interest. For the selection of parameter values for the creation of arcs we refer to the work of Leyton-Brown et al. (2000). The values chosen in Leyton-Brown et al. (2000) lead to a slightly non-planar graph with 183 arcs, which is regarded by the authors as a reasonable reproduction of real-world networks. Yet, the number of arcs is certainly smaller than the number of links in a real-world road network. That is why the model only accounts for inter-city motorway traffic.

The network has been generated randomly only once. The resulting network is shown in Figure 1 and has been used subsequently for all experiment runs in order to ensure comparability and reproducibility of the obtained results. Yet, to validate and verify the results, experiments have been repeated with other randomly generated networks.

For the simulation, the software AnyLogic 7 has been used. AnyLogic is a well-established simulation tool that is based on Java and therefore offers a high modeling flexibility (Borshchev 2013). An agent-based simulation model is used, because it is most suitable to depict heterogenic behaviour of multiple actors. Furthermore, agent-based simulation allows for modelling complex interdependencies between agent decisions and strategies and outputs their effects on the overall system (Deckert and Klein 2010).

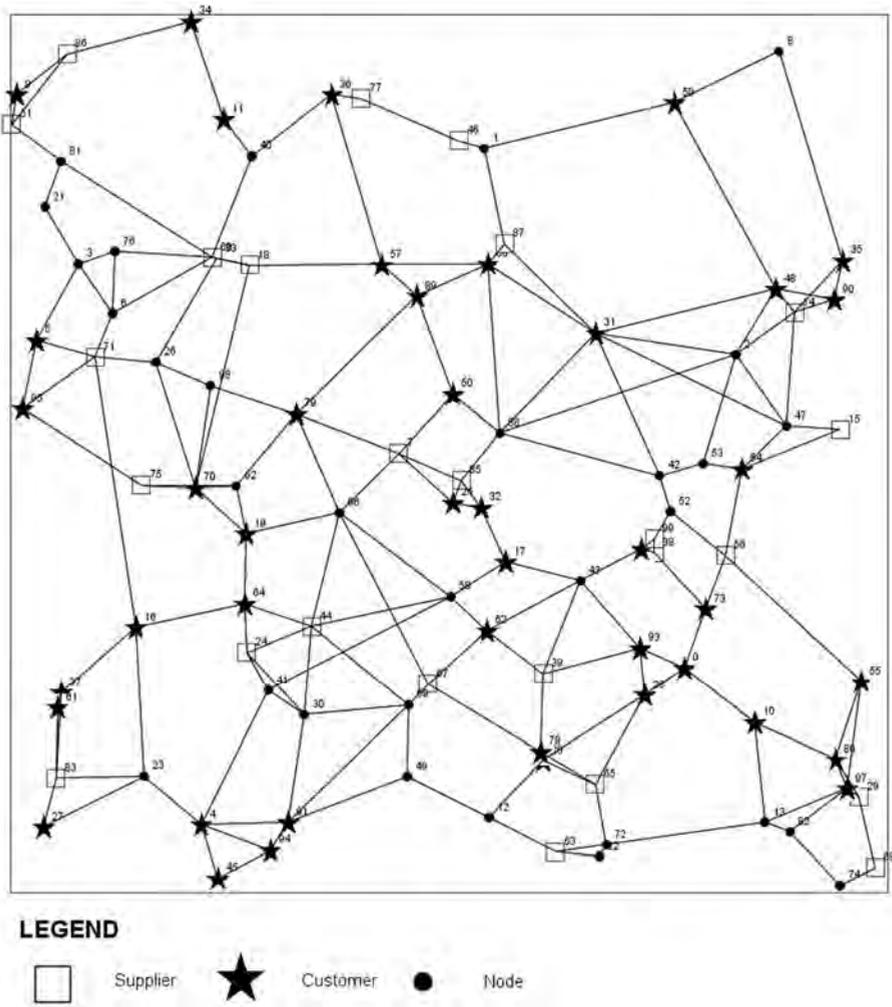


Figure 1: Generic network created according to Leyton-Brown et al. (2000) that has been used in the simulation model

2.2 Order Generation and Experimental Design

Each customer in the model is assigned to exactly one supplier. During the runtime of the simulation model, orders for goods are randomly created by customers and send to their suppliers. The creation of new orders happens at a random point uniformly distributed within a predefined 30 min time window. The beginning of the time window is defined by a parameter giving the minimum time between two orders of one customer. By systematically altering this parameter, the frequency and therefore the total number of orders is changed. Ten different configurations for the minimal time between orders have been simulated. The configurations can be found in Table 1. For this research, every configuration has been run 50 times with a model time duration of 4320 minutes (three days) each, leading to a total of 500 simulation runs.

Upon receiving an order, suppliers send a truck on the shortest path to the respective customer in order to fulfil the order. The truck then returns to its home supplier. Therefore, the total number of trucks generated by the simulation model is directly dependent of the number of orders. The average number of orders generated within the three days simulation time of all model runs for one configuration is also given in Table 1.

Table 1: *Different configurations of time between orders used in the simulation model*

Configuration No	Minimal time between orders	Maximal time between orders	Average number of orders created	Average number of trucks per day on busiest section
1	5	35	9514	358
2	10	40	7568	285
3	15	45	6281	236
4	20	50	5364	202
5	25	55	4683	176
6	30	60	4156	156
7	35	65	3733	140
8	40	70	3388	127
9	45	75	3099	116
10	50	80	2857	107

According to traffic census data published by the Bundesamt für Straßenverkehr, the busiest section of German motorways has been used by approximately 21,900 heavy-duty vehicles per day in the year 2015 (Bundesamt für Straßenverkehr 2017). Heavy-duty vehicles include all trucks and busses with a gross weight of more than 3.5 tons. Table 1 gives the average number of trucks per day on the busiest model section during model runtime. Comparing these numbers, it can be seen that the number of trucks on the busiest section of the model is only between 1.6 % and 0.5 % of the number of heavy-duty vehicles on the busiest section of German motorway. Therefore, results of the model are valid under the assumption that just a small share of heavy-duty vehicles is equipped with platooning technology. This is assumed to be a valid assumption, as platooning technology will not be used by every heavy-duty vehicle. Furthermore, the implementation of platooning technology will not happen instantaneously for all vehicles but most likely subsequently over a period of time.

3 Results

3.1 Influence of the Number of Trucks

For each truck in every simulation run of the different configurations, the driven route is saved in a database along with the timestamps of the truck's entry and exit on each section (arc) along its route. By that, the time between two trucks on every section can be obtained and evaluated for every configuration of parameters. This gives the potential time a truck has to wait at an intersection until another truck appears that it can form a two-vehicle platoon with. This time is then analysed in dependence of the number of orders created, i.e. the number of trucks in the system. The number of trucks in the system can be regarded as the number of trucks equipped with platooning technology in a real-world network. Altering the number of trucks in the system is of interest in order to account for the uncertainty when predicting the speed at which platooning technology is integrated into vehicles. The average minimum and maximum waiting time at each section have been calculated over all model runs and are presented in Figure 2. As can be expected, average waiting times decrease with an increasing number of orders in the system. Average maximum waiting times lie between 17 min for configuration 1 (9514 orders on average) and 57 min for configuration 10 (2857 orders on average). Average minimum waiting times range from 6 min for configuration 1 to 18 min for configuration 10. As can be observed in Figure 2, average minimum waiting times are less effected by the number of orders, resulting in a slightly less decreasing curve. Yet, low average waiting times are less probable, leading to the curve for average waiting times being located closer to average maximum waiting times than to average minimum waiting times.

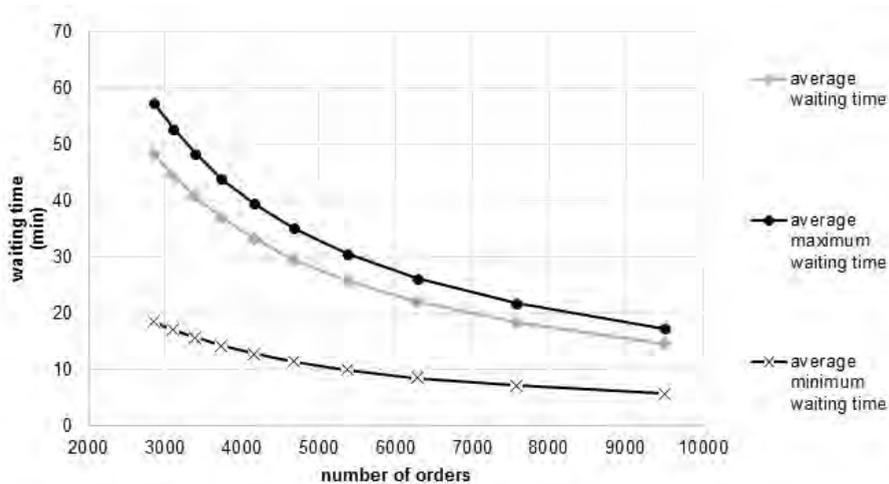


Figure 2: Average waiting times per section in dependence of the number of generated orders

Interestingly, results also show that the node degree has only a minor influence on waiting times at the beginning of adjacent sections. On a node that is connected to a

higher number of sections, more trucks arrive as the node is potentially part of a higher number of routes. Yet, also the number of possible sections via which a truck can leave the node is higher. Waiting times have to be calculated separately for each section and not for each node as platooning is only possible if two trucks are moving along the same section.

3.2 Influence of the Maximum Waiting Time

Furthermore, a maximum waiting time at each section can be assigned and compared to the calculated inter-arrival times between trucks at intersections. By that, the possibility of trucks waiting at intersections along their route for following trucks to form a platoon with can be analysed. Here, the possible percentage of sections that can be driven in a platoon together with another truck but without exceeding this maximum waiting time at each section is obtained from the model. This percentage is calculated as the percentage of all routes that can be driven as a platoon by all trucks during the simulation's runtime.

The maximum waiting time is varied between 0 and 80 min. Results are presented in Figure 3. It is obvious, that for a maximum waiting time of 0 min, no section can be driven in a platoon, as there are no two trucks arriving at an intersection at the very same moment. Furthermore, it can be observed that for a maximum waiting time of 48 min, even in configuration 10 with an average of only 2857 orders, more than 90 % of routes can be driven in a platoon. For configuration 1 with an average of 9514 orders, more than 90 % of routes can already be driven as a platoon when trucks are allowed to wait 14 min at each intersection.

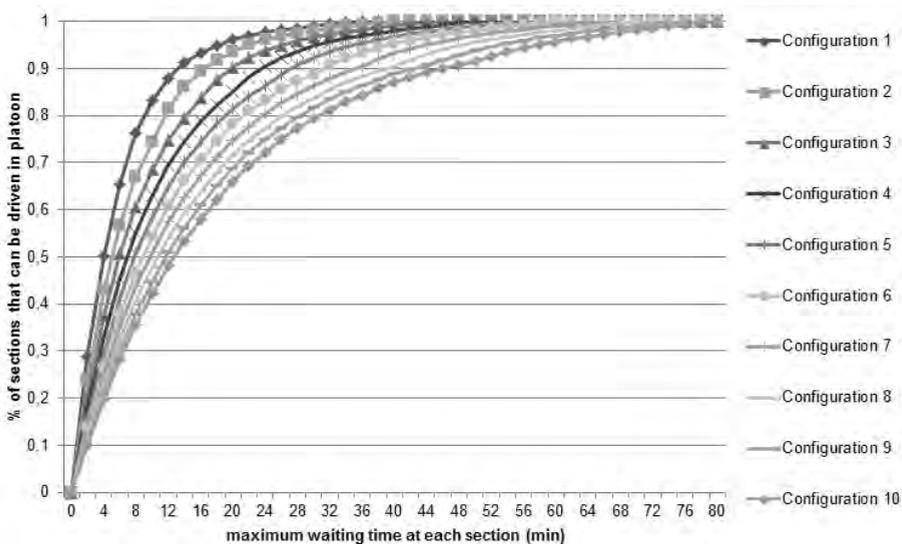


Figure 3: Percentage of number of sections of all routes that can be driven as a platoon for different maximum waiting times

As can be seen in Figure 1, sections can differ widely in length. Driving in a platoon on a longer section is advantageous compared to platoon driving on shorter sections

as it leads to a higher percentage of the overall length of the route being driven in a platoon. Yet, only the number of sections but not their length is considered in Figure 3. The lengths of each section can be easily calculated as the Euclidean distance between the two adjacent nodes. Therefore, it is of interest to also analyse the total length of all routes that can be driven in a platoon for given maximum waiting times. Results are depicted in Figure 4. Note that the percentage of length that can be driven as a platoon is again calculated as the sum of platooning distance of all tours divided by the total length of all tours. It can be observed that the lines for configurations 4 to 10 in Figure 4 experience a change in their steepness for values around a percentage of route length of approximately 50 %. This change in steepness is caused by the way orders are generated in the model: As can be seen in Figure 4, the change in steepness is always located at a waiting time that is equal to the minimum time between the generation of two orders in the respective configuration. For this waiting time and for waiting times above, even sections that are only part of one route can be driven in a platoon as trucks can now wait for other trucks coming from the same supplier. Because this change in steepness can hardly be seen in Figure 3, it can be assumed that mainly longer routes which have a disproportional high influence on the overall route length are affected by this.

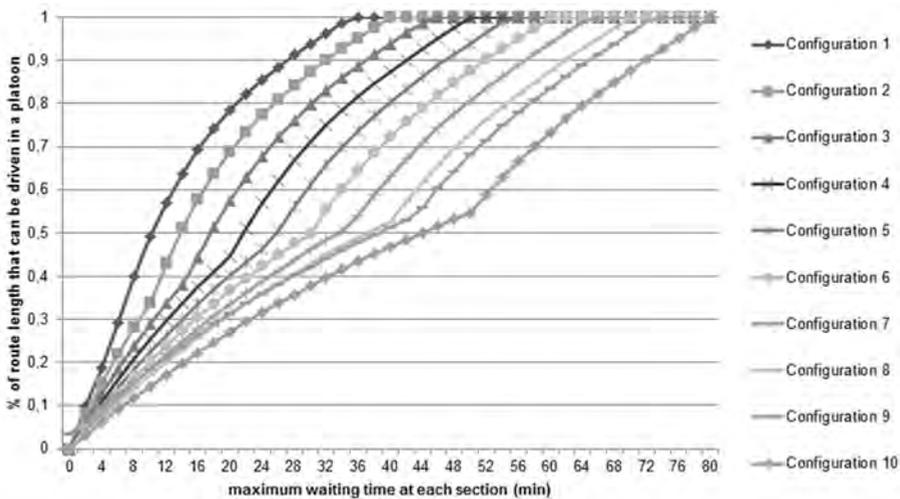


Figure 4: Percentage of length of all routes that can be driven as a platoon for different maximum waiting times

4 Conclusion

We have proposed a modelling approach using an agent-based simulation to investigate decentralized platoon planning of trucks in a road freight network. By using a generic network and randomly created transports, the influence of different parameters can be analysed by the model. In a first study, we have analysed the times trucks need to wait at intersections in the network until other potential vehicles to form a platoon with arrive. First of all, the waiting times in dependence of orders have been investigated, showing the expected result that the average waiting times

decrease when the number of orders and thus the number of trucks in the system rises. Secondly, the influence of the maximum waiting times at each intersection on the percentage of route that can be driven as a platoon has been investigated. By doing so, the maximum waiting time for a given number of trucks in the system can be calculated, at which all routes in the given simulation model can be driven in a platoon. Waiting leads to later arrival times of trucks at their final destination, resulting in potential costs due to delayed shipments or the requirement for additional planning effort. The model proposed in this work thus helps estimating the trade-off between savings generated by platooning (e. g. because of lower fuel consumption) and the cost for waiting times along a truck's route. Nevertheless, the approach poses some drawbacks:

First of all, it has to be clarified that actual platoons are not simulated in this research. Instead, evaluation of the model output is done retrospectively and only two-vehicle platoons are considered. This means that the possibility of accumulation of waiting times caused by the next truck wanting to wait for a platoon himself as well is not yet part of the model. Still, for a given number of tours inside the network, the research provides an insight into the expected waiting times necessary for platoon forming due to waiting for following trucks.

Secondly, by using a generic network, the applicability of the results to real-world networks is only limited. To better depict real-world networks, simulation experiments should be repeated with higher numbers of orders created during the model's runtime. Instead of creating orders randomly, using real-world traffic data for generating transports in the model might also be an interesting approach. For future research, transferring the model to a real-world network and repeating the experiments is also of interest.

Thirdly, instead of waiting for other trucks at intersections, trucks can decide to deviate from their shortest route in order to take a busier route that offers more platooning possibilities and thus requires less waiting time for platoon forming. The simulation model at hand does offer manifold possibilities to implement route deviation for better platooning options. Nevertheless, this hasn't been in the focus of the research yet but will be targeted in future work.

For future practical application, the model can be used to quantify the trade-off between savings generated by platooning and the costs of the required waiting times. Furthermore, the model may be of help to identify route sections with low necessary waiting times which therefore offer a high potential for platooning.

References

- Bonnet, C.; Fritz, H.: Fuel Consumption Reduction in a Platoon: Experimental Results with two Electronically Coupled Trucks at Close Spacing. In: Proceedings of the Future Transportation Technology Conference, Costa Mesa (USA), 2000.
- Borshchev, A.: The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America, 2013.
- Bronzini, M. S.; Singuluri, S.: Scoping Study for a Freight Data Exchange Network. NCHRP Project 8-36 Task 79, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2009.

- Bundesamt für Straßenverkehr: Manuelle Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse auf Bundesautobahnen. http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Autobahnen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Last Access 04.05.2017.
- Deckert, A.; Klein, R.: Agentenbasierte Simulation zur Analyse und Lösung betriebswirtschaftlicher Entscheidungsprobleme. *Journal für Betriebswirtschaft* 60 (2010) 2, pp. 89–125.
- van de Hoef, S.; Johansson, K. H.; Dimarogonas, D. V.: Fuel-Optimal Centralized Coordination of Truck Platooning Based on Shortest Paths. *American Control Conference, Chicago (USA), 2015*, pp. 3740-3745.
- Kavatkar, P.; Chen, Y. Q.: Vehicle Platooning: A Brief Survey and Categorization. In: *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference, 3: ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Parts A and B, Washington (USA), 2011*, pp.829-845.
- Larson, J.; Kammer, C.; Liang, K.-Y.; Johansson, K.H.: Coordinated route optimization for heavy-duty vehicle platoons. In: *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, The Hague (The Netherlands), 2013*, pp. 1196–1202.
- Larsson, E.; Sennton, G.; Larson, J.: The vehicle platooning problem. Computational complexity and heuristics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 60 (2015), pp. 258–277.
- Leyton-Brown, K.; Pearson, M.; Shoham, Y.: Towards a Universal Test Suite for Combinatorial Auction Algorithms. In: *Jhingran, A.; MacKie Mason, J.; Tygar, D. (Eds.): Proceedings of the 2nd ACM conference on Electronic commerce, Minneapolis (USA), 2000*, pp. 66–76.
- Liang, K.-Y.; van de Hoef, S.; Terelius, H.; Turri, V.; Besselink, B.; Mårtensson, J.; Johansson, K.H.: Networked control challenges in collaborative road freight transport. *European Journal of Control* 30 (2016), pp. 2–14.
- Saeednia, M.; Menendez, M.: A Consensus-Based Algorithm for Truck Platooning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18 (2017) 2, pp. 404–415.
- Santini, S.; Salvi, A.; Valente, A.S.; Pescape, A.; Segata, M.; Cigno, R.L. (2016): A Consensus-Based Approach for Platooning with Inter-Vehicular Communications and its Validation in Realistic Scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66 (2017) 3, pp. 1985-1999.
- Sugimachi, T.; Fukao, T.; Suzuki, Y.; Kawashima, H. (2013): Development of Autonomous Platooning System for Heavy-duty Trucks. *IFAC Proceedings* 46 (2013) 21, pp. 52–57.
- Tsugawa, S.; Jeschke, S.; Shladover, S.E.: A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 1 (2016) 1, pp. 68–77.
- Yazbeck, J.; Scheuer, A.; Charpillat, F.: Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation; ICRA. Hong Kong (China), 31. 2014*, pp. 631-638.

Data Farming im Kontext von Produktion und Logistik

Data Farming for Production and Logistics

Niclas Feldkamp, Sören Bergmann, Steffen Straßburger, TU Ilmenau, Ilmenau (Germany), niclas.feldkamp@tu-ilmenau.de, soeren.bergmann@tu-ilmenau.de, steffen.strassburger@tu-ilmenau.de

Thomas Schulze, Universität Magdeburg, Magdeburg (Germany), thomas.schulze@ovgu.de

Abstract: Simulation is an established methodology for planning and evaluating manufacturing and logistics systems. Usually simulations experts conduct experiments for a prior defined goal and by minimizing the number of simulation runs. In contrast to that, data farming describes an approach for using the simulation model as a data generator for broad scale experimentation with a broader coverage of system behaviour. This paper demonstrates how to apply data farming methodologies on simulation models in the context of production and logistics and how to analyse massive amounts of simulation data using data mining and visual analytics.

1 Einführung

Simulation ist ein etabliertes Werkzeug zur Planung und Steuerung komplexer Produktions- und Logistiksysteme. Insbesondere ist Simulation eine Schlüsselkomponente auch hinsichtlich der Herausforderungen im Kontext von Industrie 4.0 (Krückhans und Meier 2013). Der Ablauf traditioneller Simulationsstudien ist hierbei üblicherweise darauf ausgelegt, einen vorher definierten Projektumfang bzw. ein konkretes (Projekt-) Ziel zu erfüllen, z. B. die Optimierung eines Fertigungslayouts (Law 2003; Sargent 2013). Zur Zielerreichung wird daher in der praktischen Anwendung meist durch manuelles Experimentieren oder durch die Nutzung von simulationsbasierten Optimierungsverfahren nach guten Lösungen gesucht. In jedem Fall wird hierbei versucht, die Anzahl der durchzuführenden Experimente möglichst gering zu halten (Law 2014).

Mit steigender Rechenleistung und der allgemeinen Verfügbarkeit von Big-Data-Infrastrukturen sowie Fortschritten auf dem Gebiet des Data Mining erwächst hier allerdings eine weitere Anwendungsmöglichkeit für Simulationsmodelle: Das Durchführen einer sehr großen Bandbreite von Experimenten, um versteckte, vorher unbekannte und möglicherweise nützliche Wirkzusammenhänge aufzudecken.

Gerade in komplexen Systemen können möglicherweise Beziehungen, Probleme oder sogar Lösungen vorhanden sein, die über das definierte Projektziel einer klassischen Simulationsstudie hinausgehen, aber dennoch zur Entscheidungsunterstützung beitragen können. Das Vorhandensein solcher Zusammenhänge kann bereits durch einfache Sensitivitätsanalysen gezeigt werden (Rabe et al. 2008). Grundlage bildet die Methodik des *Data Farming* (Horne und Meyer 2010; Kallfass und Schlaak 2012). Hierbei wird das vorab validierte Simulationsmodell als Datengenerator genutzt, um mit Hilfe von intelligentem Experimentdesign ein möglichst großes oder gar vollständiges Spektrum an Modell- bzw. Systemverhalten (Wirkungsraum) abdecken zu können (Sanchez 2014; Sanchez und Wan 2009; Kleijnen et al. 2005). Auf der erzeugten Datenbasis können dann mit Hilfe von Data-Mining-Methoden interessante Zusammenhänge in den erzeugten Daten aufgedeckt werden (Fayyad et al. 1996). Ein Vorgehensmodell für eine solche Wissensentdeckung in Simulationsmodellen wurde in vorausgegangen Publikationen bereits entwickelt (Feldkamp et al. 2015a).

Ziel dieses Beitrags ist die Vertiefung der Methodik von Data Farming und Wissensentdeckung speziell für Simulationsmodelle im Kontext von Produktion und Logistik. Aufbauend auf den bisherigen Veröffentlichungen werden die Besonderheiten von Produktion- und Logistiksystemen in das Zentrum der Betrachtung gestellt. Hierzu wird gezeigt, welche Fragestellungen und Probleme relevant sind und was die zuvor beschriebene Methodik leisten kann. Zudem wird dargestellt, wie dies konzeptionell und technisch umgesetzt werden kann.

Der Aufbau des Beitrags ist hierbei wie folgt: Nach der Einleitung folgt ein kurzer Forschungsüberblick zum Thema Data Farming und daran anknüpfender, relevanter Themengebiete. Danach werden die speziellen Herausforderungen und Fragestellungen eines Simulationsmodells im Kontext von Produktion und Logistik herausgearbeitet sowie Anknüpfungspunkte und Möglichkeiten der hier beschriebenen Methodik erarbeitet. Hieraus wird eine Vorgehensweise entwickelt und mit Hilfe einer Fallstudie veranschaulicht und validiert. Ein Kapitel mit Fazit und Ausblick schließt den Beitrag ab.

2 Grundlagen

Data Farming beschreibt eine Methodik für die Verwendung eines Simulationsmodells als Datengenerator mit Hilfe von effizientem Experimentdesign und High Performance Computing mit dem Ziel, das möglichst vollständige Spektrum von Ergebnisdaten zu erhalten und somit den Informationsgewinn zu verbessern (Sanchez 2007; Elmegreen et al. 2014; Horne und Meyer 2005; Horne und Meyer 2010). Ähnlich wie ein Farmer, der sein Land möglichst effizient kultiviert und damit versucht, seinen Ernteertrag zu maximieren, drückt die „Farming“-Metapher aus, dass hierbei der Datenertrag durch das Simulationsmodell maximiert wird (Sanchez 2014). Neue Ansätze für die Gestaltung von Simulationsexperimenten erlauben die umfassende Abbildung möglicher Wertekombinationen von Eingabeparametern bei gleichzeitig vertretbaren Datenmengen (Kleijnen et al. 2005; Sanchez und Wan 2009). Data Farming wurde ursprünglich für militärische Gefechtssimulationen entwickelt, da hierbei sowohl die Modelle an sich als auch die daran gestellten Fragestellungen eine hohe Komplexität aufweisen, der klassische Simulationsstudien nicht mehr Rechnung tragen konnten (Horne und Meyer 2010). Aufbauend auf dem Data-Farming-Konzept wurde eine Methodik für das Auffinden von versteckten, potenziell

nützlichen Wirkzusammenhängen in Ergebnisdaten von nicht-militärischen Simulationsmodellen entwickelt (Feldkamp et al. 2015a; Feldkamp et al. 2016b). Hierbei werden sehr große Mengen von Simulationsdaten mit Hilfe von Data Farming erzeugt und mittels Data Mining verarbeitet. Die eigentliche Analyse der generierten Simulationsergebnisdaten sowie deren Beziehungen zu den Eingangsparametern (Faktoren) ist auf interaktiver, visueller Analyse aufgebaut. Visualisierung ist im allgemeinen ein wichtiges Werkzeug, wenn eine Interpretation von Daten gefordert ist (Thomas und Cook 2005). Übliche Visualisierungstechniken, die bei Simulationsstudien eingesetzt werden, umfassen Animationen, Time-Plots oder Graphen bestimmter Kenngrößen z.B. in einem Konfidenzintervall über replizierte Simulationsläufe (Law 2014). Die Forschungsdisziplin *Visual Analytics* geht allerdings noch einen Schritt weiter und strebt nach der konsequenten Verzahnung von Datenanalyse und -Visualisierung, deren Verbindungsglied die menschliche Fähigkeit zur Schlussfolgerung darstellt. Gefördert wird dies durch ein hohes Maß an Interaktivität (Keim et al. 2008; Thomas und Cook 2005). Dieses Konzept wurde in den Ansatz zur Wissensentdeckung in Simulationsdaten integriert (Feldkamp et al. 2015b; Feldkamp et al. 2016a) und in Industriefallstudien erprobt (Feldkamp et al. 2016b). Abbildung 1 zeigt das schematische Vorgehensmodell für die Wissensentdeckung in Simulationsdaten. Durch Methoden des Data Farming wird eine große Datenmenge erzeugt, um das Systemverhalten in Gänze abzubilden. Die eigentliche Wissensentdeckung erfolgt dann durch visuell gestützte Analysen, insbesondere der Beziehungen von Eingangs- zu Ausgangsdaten. Dazu werden die Daten vorher durch Data-Mining-Algorithmen verarbeitet, beispielsweise durch eine Klassifizierung mittels Clustering-Verfahren.

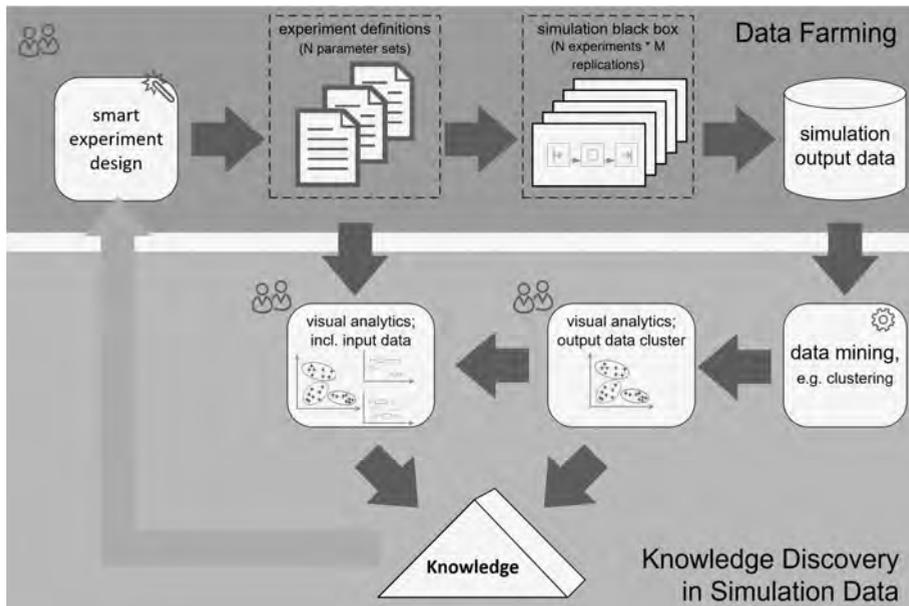


Abbildung 1: Wissensentdeckung in Simulationsdaten (Feldkamp et al. 2015a, S. 5).

3 Data Farming in Produktion und Logistik

Data Farming stellt die Untersuchung der Beziehungen und Zusammenhänge zwischen Eingabeparametern und Ergebnisdaten, sowie den Ergebnisdaten an sich in den Vordergrund. Diese Methodik wurde, wie oben bereits erwähnt, im militärischen Kontext entwickelt und hauptsächlich für komplexe, agentenbasierte Gefechts-simulation eingesetzt. Wie in unseren vorherigen, darauf aufbauenden Publikationen bereits gezeigt, lässt sich die Data-Farming-Methodik auch sehr gut in diskret ereignisgesteuerten Modellen anderer Anwendungsdomänen einsetzen. Abgeleitet aus den Erfahrungen bisheriger Data-Farming-Projekte und Publikationen haben wir Fragestellungen für den Anwendungskontext von Simulationsmodellen für Produktion und Logistik entwickelt. Typische Leitfragen, die hierbei mit Data Farming bearbeitet werden können, sind u. a.:

- Welche Eingabeparameter haben den größten Einfluss die Ergebnisdaten?
- Gibt es signifikante Wechselwirkungen zwischen den Eingabeparametern?
- Wie verteilen sich die Ergebnisdaten?
- Welche Auftragsportfolios/Produktmixe sind kritisch hinsichtlich bestimmter Zielgrößen?
- Welche Kombinationen von verschiedenen Eingabedaten (Konfigurationen) sind robust gegenüber Produktmix/-sequenz?
- Welche Konfigurationen sind robust gegenüber nicht beeinflussbaren Störgrößen?
- Welche Eingabeparameter haben einen (positiven oder negativen) Einfluss auf die Robustheit von Konfigurationen?
- Welche Ergebnisgrößen sind empfindlich gegenüber Zufallseinflüssen und Schwankungen?

Entsprechend dem obigen Vorgehensmodell zur Wissensentdeckung in Simulationsdaten werden im Folgenden beispielhaft einige wenige ausgewählte Leitfragen anhand einer Fallstudie bearbeitet.

4 Fallstudie

Für eine Demonstration der Vorgehensweise wird ein Modell einer Fertigungslinie in Siemens Plant Simulation implementiert. Dieses Modell wird mit dem Ziel entwickelt, leicht verständliche Prozesse darzustellen, aber dennoch eine ausreichende Komplexität für die Durchführung eines Data-Farming-Projektes aufzuweisen. Abbildung 2 zeigt ein 2D- und 3D-Layout dieses Modells.

In diesem Modell werden fünf verschiedene Produkttypen auf Werkstückträger geladen und auf einer Förderstrecke transportiert. Der anteilige Mix von Produkttypen kann variieren, wobei ein eingehender Auftrag in einem Eingangspuffer gelagert und ggf. umsortiert werden kann, bis die Freigabe erfolgt und der Auftrag auf einen freien Werkstückträger montiert werden kann. Produkte werden sowohl maschinell an Fertigungsstationen, als auch manuell auf Arbeitsplätzen bearbeitet. Abschließend werden bearbeitete Produkte einer Qualitätsprüfung unterzogen, bevor sie abgeladen werden und das System verlassen.

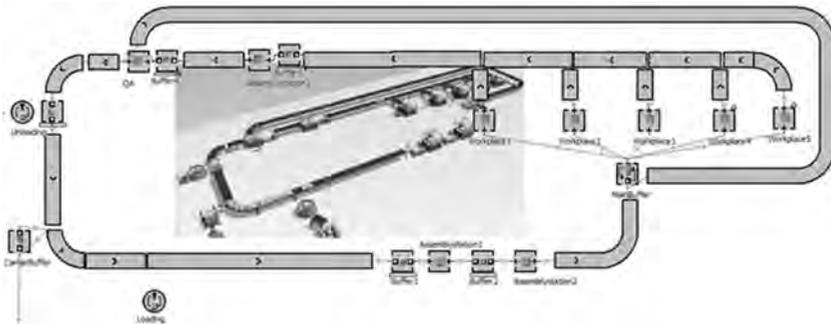


Abbildung 2: 2D- und 3D-Darstellung des Plant Simulation Modells.

Der erste Schritt für ein Data-Farming-Projekt (nach Modellimplementierung und -validierung) besteht im Definieren von Eingangsparametern (Faktoren) und das Erstellen eines Experimentplans. Faktoren lassen sich in verschiedene Kategorien unterteilen, wie Entscheidungsfaktoren, die sich im realen System tatsächlich beeinflussen lassen und Störfaktoren, welche unkontrollierbar sind. Auch mehr als zwei Kategorien sind denkbar, die tatsächliche Ausgestaltung hängt hierbei vom jeweiligen Modell und Anwendungskontext ab. Im vorliegenden Modell wurde zwischen Entscheidungsfaktoren und Faktoren für den Produktmix unterschieden, d. h. jeweils ein Faktor für den prozentualen Anteil eines bestimmten Produkttyps (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die Entscheidungsfaktoren des Modells.

Name des Faktors	Beschreibung	Wertebereich
<i>LoadingTime</i>	Zeit für das Aufladen auf Werkstückträger	10 – 60 s
<i>UnloadingTime</i>	Zeit für das Abladen vom Werkstückträger	10 – 60 s
<i>ArrivalTime</i>	Zeitabstand für Auftragsfreigabe	100 – 300 s
<i>ClearanceStrategy</i>	Sortierstrategie für Aufträge (FIFO, Losgröße von 5/10/unbegrenzt)	1 - 4
<i>BufferXCap</i>	Puffergröße (ein Faktor je Puffer)	1 - 100
<i>#Workplaces</i>	Anzahl Arbeitsplätze	1 - 4
<i>#Carriers</i>	Anzahl Werkstückträger im System	1 - 100
<i>WP_ProcTimeVar</i>	Erlaubte Streuung der Bearbeitungszeit	100 – 300 s
<i>QA_ProcTimeMean</i>	Mittlere Prozesszeit der QA-Station	100 – 300 s

Für beide Faktorkategorien, Entscheidungsfaktoren und Produktmix, werden jeweils voneinander unabhängige Experimentpläne basierend auf der *Nearly-Orthogonal-Latin-Hypercube-Methode* (NOLH) erstellt und miteinander gekreuzt. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass sich Effekte in Entscheidungsfaktoren jeweils über die komplette Bandbreite der Produktmixausprägungen untersuchen lassen. Ist ein bestimmter Effekt signifikant über alle Experimente, kann diese daraus abgeleitete Erkenntnis als robust gegenüber Schwankungen im Produktmix angesehen werden.

Robustheit ist mitunter ein sehr wichtiges, aber schwer zu bestimmendes Kriterium bei der Planung von Produktions- und Logistiksystemen. Hieraus resultierten für das finale Experimentdesign ca. 260.000 Simulationsläufe, welche auf einem Rechencluster mit zehn Maschinen parallel ausgeführt wurden.

Die Simulationsergebnisse wurden in CSV-Dateien geschrieben und nach Durchführung aller Experimente aggregiert. Für die Analyse und Visualisierung der Daten wurden hauptsächlich MATLAB und R verwendet. Im Folgenden sollen nun beispielhaft drei typische Leitfragen (siehe Abschnitt 3) besprochen werden:

Frage 1: Welche Eingabeparameter haben den größten Einfluss auf die Ergebnisdaten?

Um ein allgemeines Verständnis und eine erste Einschätzung für die Beziehungen zwischen Faktoren und Ergebnisdaten im Modell zu erhalten, ist das Erstellen einer Korrelationsmatrix über alle Parameter hilfreich. Diese wird in Abbildung 3 gezeigt. Die farbliche Kodierung zeigt hierbei jeweils positive oder negative Korrelationsbeziehungen zwischen zwei Parametern an.

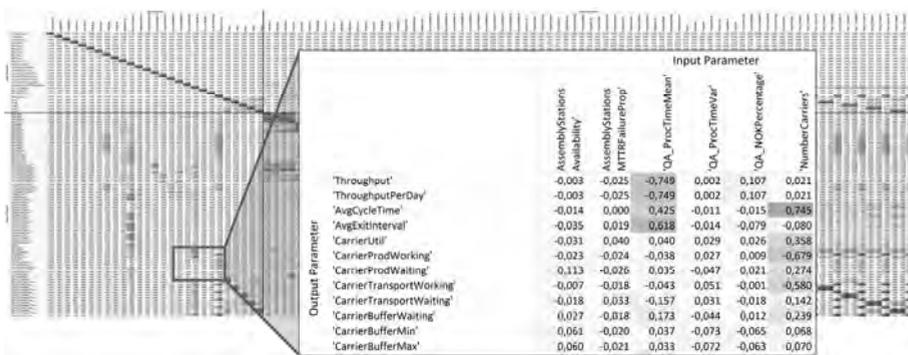


Abbildung 3: Korrelationsmatrix über alle Faktoren- und Ergebnisparameter.

Der schwarze Trennstrich markiert die Aufteilung zwischen Faktoren und Ergebnisparametern. Faktoren sollten untereinander generell unkorreliert sein, da sonst eventuelle Effekte nicht verzerrungsfrei analysiert werden können. Eine gute Experimentdesignmethode sollte dies gewährleisten. Lediglich die Faktoren für den Produktmix korrelieren miteinander, da diese per Definition in Summe immer 100% ergeben müssen. Betrachtet man die Korrelationen zwischen Faktoren und Ergebnisdaten, werden einige Einflussbeziehungen offenkundig. Zwar ist eine Korrelation eigentlich ungerichtet, in einem Simulationsmodell kann aber ein kausaler Zusammenhang zwischen Faktoren und Ergebnisdaten unterstellt werden. So hat im Beispielmodell etwa der Faktor Prozesszeit der Quality-Assurance-Station (QA) einen stark negativen Einfluss auf den Durchsatz. Für eine erste Einschätzung des Modellverhaltens ist eine Korrelationsmatrix gut geeignet. Allerdings ist zu beachten, dass insbesondere Interaktionseffekte, das heißt zwei oder mehr Faktoren, die erst in einer bestimmten Kombination einen signifikanten Effekt auf einen Ergebnisparameter ausüben, hierbei nicht ersichtlich werden.

Frage 2: Wie verteilen sich die Ergebnisdaten?

Um mögliche Strukturen in den Ergebnisdaten zu entdecken und diese zu klassifizieren, wird ein Clustering-Algorithmus verwendet. Dieser gruppiert die Datensätze der Simulationsexperimente in Ähnlichkeitsgruppen (Cluster) anhand bestimmter Dimensionen ein. Werden die Simulationsexperimente anhand von Ergebnisparametern gruppiert, lassen sich die Experimente folglich in verschiedene Performancegruppen einteilen. Als Maßzahl für die Güte eines Clusterings lässt sich der sogenannte Silhouettenkoeffizient heranziehen. Abbildung 4 zeigt diesen Wert jeweils für verschiedene Clusteranzahlen und Distanzmaße. Das Distanzmaß ist eine algorithmische Berechnungsvorschrift für die Bewertung der Ähnlichkeit von Datenpunkten.

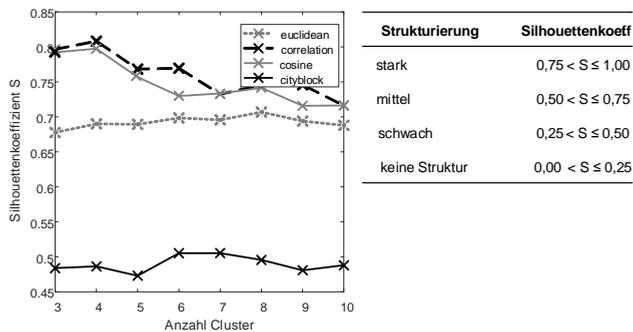


Abbildung 4: Silhouettenkoeffizient für verschiedene Clusteranzahlen und Distanzmaße.

Das beste Clustering erhält man folglich durch die Wahl von vier Clustern und dem „Correlation“- Distanzmaß. Das daraus resultierende, finale Clustering ist in Abbildung 5 dargestellt.

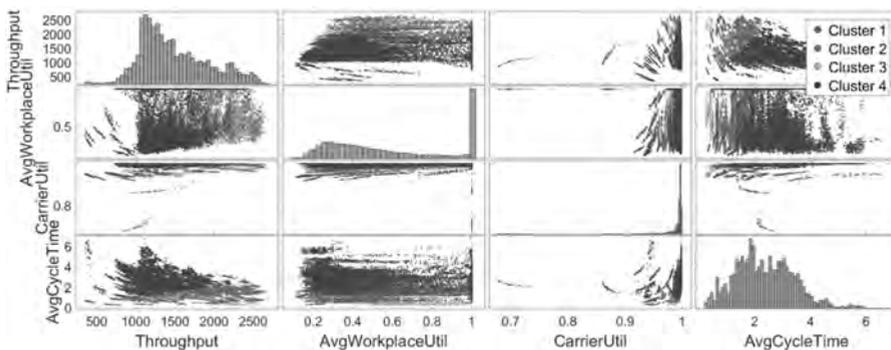


Abbildung 5: Matrixplot für relevante Ergebnisparameter.

Die hierfür herangezogenen Ergebnisparameter sind Durchsatz, durchschnittliche Auslastung der Arbeitsplätze und Werkstückträger sowie die durchschnittliche

Durchlaufzeit. Dargestellt sind jeweils 2D-Streudiagramme in sämtlichen Kombinationen über alle vier Parameter, gefärbt nach der jeweiligen Clusterzuordnung. Diagonal finden sich zusätzlich jeweils Histogramme, um den allgemeinen Wertebereich und die Häufigkeit der Parameterwerte einschätzen zu können. Cluster 3 beinhaltet die Simulationsexperimente mit der besten Performance, d. h. hoher Durchsatz, hohe Auslastung von Arbeitsplätzen und Wertstückträgern sowie eine geringe Durchlaufzeit. Im nächsten Schritt sollen nun analysiert werden, wie sich die Parameterwerte der einzelnen Faktoren in den jeweiligen Clustern, insbesondere Cluster 3 verteilen.

Frage 3: Gibt es signifikante Wechselwirkungen zwischen den Faktoren?

Wenn ein bestimmter Faktorwert in einem Cluster dominant ist, kann man davon ausgehen, dass dieser Wert maßgeblich für die Clusterzuordnung ist und somit einen Einfluss auf die korrespondierenden Ergebnisgrößen hat. Auf der anderen Seite hat ein Faktor keinen Einfluss, wenn er innerhalb eines Clusters nahezu gleich verteilt ist. Sind mehrere Faktorwerte dominant, ist davon auszugehen, dass die bestimmte Kombination dieser Werte maßgeblich ist und möglicherweise ein Interaktionseffekt besteht. Abbildung 6 (oben) zeigt sogenannte Spinnennetzdiagramme für ausgewählte Faktoren jeweils für die vier Cluster. Die gepunkteten Linien zeigen hierbei jeweils das obere und untere Quartil der Daten an, die durchgezogene Linie den Median. Je enger die Linien bei einander liegen, desto dominanter ist ein bestimmter Faktorwert innerhalb des Clusters. Der Zielcluster 3 hat jeweils in allen fünf Dimensionen sehr dominante Faktorausprägungen. Für eine bessere Ablesbarkeit der konkreten Werte wurden für Cluster 3 zusätzlich je ein Box-Whisker-Plot erstellt (Abb. 6 unten).

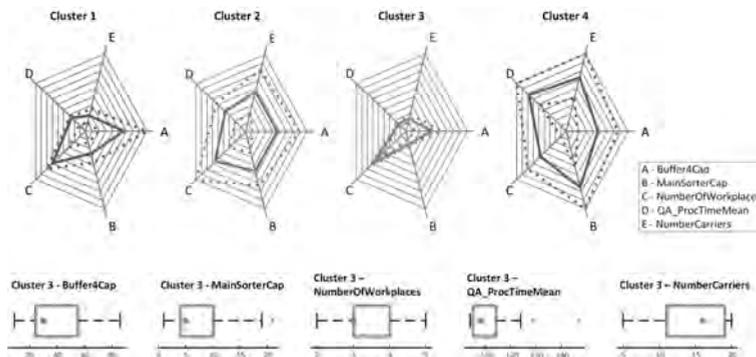


Abbildung 6: Spinnennetzdiagramme und Box-Whisker-Plots für ausgesuchte Inputparameter.

Um eine Zuordnung zu Cluster 3 und damit die beste Systemperformance im vorliegenden Beispielmmodell zu erhalten, sollten somit u. a. drei Arbeitsplätze bereitstehen, die Prozesszeit der QA-Station zwischen 110 und 120 Sekunden und die Anzahl der Werkstückträger bei etwa 15 liegen. Weiter ist zu erwähnen, dass die gewonnenen Erkenntnisse durch das gekreuzte Experimentdesign für alle Variationen des Produktmixes gültig sind und somit als robust betrachtet werden können. Die konkreten Parameterwerte sollten jedoch durch weitere Experimente validiert werden.

5 Fazit und Ausblick

Der Beitrag diskutiert die Einsatzmöglichkeiten des Ansatzes zur Wissensentdeckung in Simulationsdaten speziell im Kontext von Produktions- und Logistiksystemen. Hierzu werden die Besonderheiten solcher Systeme betrachtet, insbesondere wurden typische, durch den Ansatz bearbeitbare Fragestellungen aufgezeigt. Zu Verdeutlichung werden beispielhaft einige typische Fragestellungen in Form einer Fallstudie aufgegriffen und bearbeitet. Es kann gezeigt werden, dass Wirkzusammenhänge aufgedeckt und potenziell nützlich Wissen generiert werden kann. Da trotzdem per definitionem vom Vorhandensein valider Modelle ausgegangen wird, empfiehlt es sich, die Ergebnisse, wie bei allen simulationsbasierter Methoden, kritisch auf Plausibilität zu prüfen. Gerade komplexe, teilautomatisierte Methoden wie die des Data Mining und Visual Analytics können im Extremfall Effekte aufdecken, die ausschließlich auf den enthaltenen Modellfehlern basieren. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht bei den genutzten Werkzeugen, um auch Nicht-Experten die Nutzung des Ansatzes zu ermöglichen. Hierbei sind sowohl die Integration der benötigten Methoden in die Simulatoren als auch die interaktive Visualisierung großer Datenmengen eine Herausforderung für die nahe Zukunft. Des Weiteren bestehen diverse Forschungsbedarfe, z. B. bzgl. des Experimentdesigns der Produktmixe unter Beachtung der Qualitätskriterien, wie der Orthogonalität, Ausgeglichenheit, sowie der Anzahl der benötigten Experimente. Weitere Forschungen zu den Themen Robustheit oder dynamisches Experimentdesign sind ebenfalls denkbar.

Literatur

- Elmegreen, B.G.; Sanchez, S.M.; Szalay, A.S.: The Future of Computerized Decision Making. In: Tolk, A.; Diallo, S.D.; Ryzhov, I.O.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, Savannah GA. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2014, S. 943–949.
- Fayyad, U.M.; Piatetsky-Shapiro, G.; Smyth, P.: From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *AI Magazine* 17 (1996), S. 37–54.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Strassburger, S.: Knowledge Discovery in Manufacturing Simulations. In: Proceedings of the 3rd ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation. New York, NY, USA: ACM, 2015a, S. 3–12.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Strassburger, S.: Visual Analytics of Manufacturing Simulation Data. In: Yilmaz, L.; Chan, W.K.V.; Moon, I.; Roeder, T.M.; Macal, C.; Rossetti, M.D. (Hrsg.): Proceedings of the 2015b Winter Simulation Conference, Huntington Beach. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2015b, S. 779–790.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Strassburger, S.: Innovative Analyse- und Visualisierungsmethoden für Simulationsdaten. In: Nissen, V.; Stelzer, D.; Straßburger, S.; Fischer, D. (Hrsg.): Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI) 2016. Ilmenau: TU Ilmenau Universitätsbibliothek 2016, S. 1737–1748.
- Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Strassburger, S.; Schulze, T.: Knowledge Discovery in Simulation Data: A Case Study of a Gold Mining Facility. In: Roeder, T.M.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.): Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2016b, S. 1607–1618.

- Horne, G.E.; Meyer, T.: Data farming and defense applications. In: Armstrong, R.; McNamara, J.; Pinelli, T.E. (Hrsg.): MODSIM World Conference and Expo, Hampton, VA, USA. Hampton, VA: Langley Research Center, 2010, S. 74–82.
- Horne, G.E.; Meyer, T.E.: Data Farming: Discovering Surprise. In: Kuhl, M.E.; Steiger, N.M.; Armstrong, F.B.; Joines, J.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, FL. USA. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2005, S. 1082–1087.
- Kallfass, D.; Schlaak, T.: NATO MSG-088 Case Study Results to demonstrate the Benefit of using Data Farming for Military Decision support. In: Laroque, C.; Himmelspach, R.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC 2012), Berlin, Germany. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2012, S. 1–12.
- Keim, D.A.; Mansmann, F.; Schneidewind, J.; Thomas, J.; Ziegler, H.: Visual Analytics: Scope and Challenges. In: Simoff, S.; Boehlen, M.H.; Mazeika, A. (Hrsg.): Visual Data Mining: Theory, Techniques and Tools for Visual Analytics: Springer 2008,
- Kleijnen, J.P.; Sanchez, S.M.; Lucas, T.W.; Cioppa, T.M.: State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. *INFORMS Journal on Computing* 17 (2005) 3, S. 263–289.
- Krückhans, B.; Meier, H.: Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): Proceeding der 15. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2013, Paderborn. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, 2013, S. 31–40.
- Law, A.M.: How to conduct a successful simulation study. In: Chick, S.; Sanchez, P.J.; Ferrin, D.; Morrice, D.J. (Hrsg.): Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, LA, USA. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2003, S. 66–70.
- Law, A.M.: Simulation Modeling and Analysis. New York, N.Y.: McGraw Hill Book Co 2014.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Sanchez, S.M.: Work Smarter, Not Harder: Guidelines for Designing Simulation Experiments. 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. Piscataway, N.J.: IEEE, 2007, S. 84–94.
- Sanchez, S.M.: Simulation Experiments: Better Data, Not Just Big Data. In: Tolk, A.; Diallo, S.D.; Ryzhov, I.O.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, Savannah GA. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2014, S. 805–816.
- Sanchez, S.M.; Wan, H.: Better than a petaflop: The power of efficient experimental design. In: Rossetti, M.D.; Hill, R.R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls, R.G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC 2009), Austin, TX. Piscataway, N.J.: IEEE Inc, 2009, S. 60–74.
- Sargent, R.G.: Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation* 7 (2013) 1, S. 12–24.
- Thomas, J.J.; Cook, K.A.: Illuminating the Path: Research and Development Agenda for Visual Analytics. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society 2005.

Einsatz von Varianzreduktionstechniken in aktuellen Simulationswerkzeugen

Using Variance Reduction Techniques with State-of-the-Art Simulation Systems

Sven Völker, Hochschule Ulm, Ulm (Germany), voelker@hs-ulm.de

Kai Gutenschwager, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften,
Wolfenbüttel (Germany) und SimPlan AG, Niederlassung Braunschweig
(Germany), k.gutenschwager@ostfalia.de

Peter-Michael Schmidt, Siemens Industry Software GmbH, Stuttgart (Germany),
petermichael.schmidt@siemens.com

Abstract: Variance reduction techniques are a means to reduce computational costs in simulation studies. The paper analyses five state-of-the-art simulation systems regarding their capability to apply two different variance reduction techniques, namely Common Random Numbers and Antithetic Variates. One of these tools, Plant Simulation, is used to apply both variance reduction techniques to four simulation models of different complexity.

1 Einleitung

Der zeitliche Aufwand für die Durchführung von Simulationsläufen ist auch heute noch ein relevanter Aspekt in der Experimentplanung. Varianzreduktionstechniken (VRT) sind ein Ansatz zur Verringerung des Rechenaufwands. Bisherige Veröffentlichungen zu VRT befassen sich vorrangig mit der Frage, wie stark sich die Varianz einer Ausgangsgröße bei einer gegebenen Anzahl von Simulationsläufen reduzieren lässt. Sie zeigen, dass der Einsatz von VRT im Bereich der Materialfluss- und Logistiksimulation in bestimmten Konstellationen vorteilhaft ist (Cole et al. 2007; Adewunmi 2010; Ünlü und Rossetti 2011). Allerdings fehlen in der Fachliteratur systematische Aussagen darüber, was bei der Anwendung von VRT im Kontext konkreter Simulationswerkzeuge zu beachten ist und welche Simulationswerkzeuge den Einsatz von VRT überhaupt ermöglichen. Der Beitrag behandelt die VRT „Gemeinsame Zufallszahlen“ und „Antithetische Variablen“. Es wird untersucht, welche Eigenschaften die simulierten Systeme aufweisen müssen, welche Simulationswerkzeuge den Einsatz der beiden Techniken ermöglichen und wie bei der Modellierung vorzugehen ist. Mit Hilfe des Simulationswerkzeugs Plant Simulation werden die VRT exemplarisch auf vier Produktions- und Logistik-

systeme unterschiedlicher Struktur und Komplexität angewandt. Außer Plant Simulation werden auch die Simulationswerkzeuge AnyLogic, AutoMod, Enterprise Dynamics und Witness hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz von VRT betrachtet.

2 Grundlagen der Varianzreduktion

Die Abbildung der stochastischen Eingangsgrößen eines Simulationsmodells erfolgt mit Hilfe von Zufallszahlengeneratoren, die zufällig erscheinende Zahlenfolgen erzeugen. Da in der Regel Zufallszahlen für verschiedene Verteilungen benötigt werden, kommt ein zweistufiges Verfahren zum Einsatz: Im ersten Schritt werden im Intervall $[0,1]$ möglichst gleichverteilte Zufallszahlen produziert, so genannte Standardzufallszahlen. Dies geschieht mit Verfahren wie dem Multiplicative Linear Congruential Generator (MLCG, z. B. L'Ecuyer 1999) oder dem Multiple Recursive Generator (MRG, z. B. L'Ecuyer und Granger-Piché 2003). Die Standardzufallszahlen werden im zweiten Schritt in die gewünschte Verteilung transformiert, wobei verschiedene Verfahren angewendet werden können (Law 2014, S. 426 ff.). Im einfachsten Fall, der Inversionsmethode, wird eine Standardzufallszahl in die inverse Verteilungsfunktion der gewünschten Verteilung eingesetzt (Bratley et al. 1983, S. 25 ff.). Es existieren aber auch Verfahren, die mehrere, teilweise auch eine nicht konstante Anzahl Standardzufallszahlen zur Berechnung einer Zufallszahl der gewünschten Verteilung benötigen. Dies gilt z. B. für die Annahme-Verwerfungsmethode (Kolonko 2008, S. 97 ff.). Als Maß für die statistische Sicherheit ist meist entweder das Konfidenzintervall für den Erwartungswert der Beobachtungsgröße oder das Konfidenzintervall um die Differenz der Beobachtungsgröße zwischen zwei verschiedenen Systemkonfigurationen relevant. VRT sollen die Breiten dieser Konfidenzintervalle reduzieren.

Gemeinsame Zufallszahlen (Common Random Numbers, CRN) werden eingesetzt, um zwei Konfigurationen eines betrachteten Systems miteinander zu vergleichen. Der Vergleich der Systemkonfigurationen erfolgt mit dem Paired-*t*-Konfidenzintervall der interessierenden Ausgangsgröße (z. B. Hedderich und Sachs 2016, S. 523 ff.). Die Grundidee von CRN ist folgende: Wird mit jeder der zu vergleichenden Konfigurationen ein Simulationslauf durchgeführt, können die beobachteten Unterschiede in der Ausgangsgröße sowohl auf der unterschiedlichen Systemkonfiguration beruhen als auch zufällig sein. Werden in beiden Simulationsläufen exakt dieselben Zufallszahlen zum jeweils selben Zweck verwendet, sollte der Unterschied nur noch aus der Systemkonfiguration resultieren. CRN setzt voraus, dass die Beobachtungsgröße für die zu vergleichenden Systemkonfigurationen in prinzipiell gleicher Weise von den verwendeten Zufallszahlen abhängt. Ist beispielsweise die Zwischenankunftszeit von Aufträgen die zufällige Eingangsgröße und die Auftragsdurchlaufzeit die Beobachtungsgröße, kann für nahezu jedes logistische System unterstellt werden, dass kleine Zufallszahlen zu langen Durchlaufzeiten führen und umgekehrt. Unterscheidet sich die Wirkungsrichtung zwischen den beiden Konfigurationen, kann CRN die Varianz auch vergrößern. Zu umfassenden Erläuterungen der Methode sowie ihren mathematischen Grundlagen sei auf Law (2007), S. 578 ff., und Bratley et al. (1983), S. 44 ff., verwiesen.

Antithetische Variablen (AV) dienen im Unterschied zu CRN der Untersuchung einer Konfiguration des betrachteten Systems. Statt mehreren unabhängigen Simula-

tionsläufen werden jeweils Paare von Simulationsläufen durchgeführt, wobei im ersten Lauf eine Folge von Standardzufallszahlen (u_i) und im zweiten Lauf die Folge $(1 - u_i)$ verwendet wird. Es wird nun erwartet, dass kleine Beobachtungswerte im ersten Lauf mit großen Beobachtungswerten im zweiten Lauf korrespondieren und umgekehrt. Aufgrund dieser negativen Korrelation liegt der Mittelwert beider Beobachtungen näher am Erwartungswert der Beobachtungsgröße als der Durchschnitt der Mittelwerte zweier unabhängiger Läufe. Dadurch verringert sich die Stichprobenvarianz. Ebenso wie CRN setzt AV voraus, dass bei paarigen Replikationen die Zufallszahlen bzw. deren antithetische Gegenstücke zu dem jeweils selben Zweck verwendet werden. Außerdem muss ein monotoner Zusammenhang zwischen den Zufallszahlen und der Beobachtungsgröße vorliegen, da sonst die gewünschte negative Korrelation verloren geht (Kolonko 2008, S. 211 ff.; Bratley et al. 1983, S. 56 ff.).

3 Funktionalität ausgewählter Simulationswerkzeuge

Entscheidend für den Erfolg von VRT ist neben den Eigenschaften des untersuchten Systems auch das verwendete Simulationswerkzeug. Es muss einige grundlegende Anforderungen erfüllen:

1. Jeder stochastischen Eingangsgröße muss ein separater Zufallszahlenstrom zugewiesen werden können.
2. Die Zufallszahlenströme müssen geeignet verwaltet werden, z. B. sollte der Modellierer die Startwerte für die Zufallszahlenströme festlegen können.
3. Zum Einsatz von AV sind antithetische Zufallszahlen bereitzustellen.
4. Für AV muss die Transformationsfunktion, mit der Standardzufallszahlen in andere Verteilungen konvertiert werden, monoton sein (siehe Abschnitt 4.1).
5. Zudem ist eine Unterstützung bei der statistischen Auswertung antithetischer Simulationsläufe wünschenswert.

Tabelle 1: Vergleich von Simulationswerkzeugen

Anforderung	Any- Logic 7	Automod 12.6	Enterprise Dynamics 10	Plant Simu- lation 13	Witness
Separate Zufalls- zahlenströme	(nein)	ja	ja	ja	ja
Automatische Ver- waltung der Ströme	nein	nur für Ressourcen	ja	nur für Bausteine	nein
Manuelle Verwal- tung der Ströme	(nein)	ja	ja	ja	ja
Erzeugung antitheti- scher Zufallszahlen	(nein)	nein	ja	ja	ja
Auswertung anti- thetischer Läufe	nein	nein	nein	nein	nein

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Erfüllung der genannten Anforderungen in aktuellen Versionen häufig genutzter Simulationswerkzeuge. Alle betrachteten

Simulationswerkzeuge sind in der Lage, Zufallszahlenströme zu reproduzieren. Standardmäßig werden die Zufallszahlenströme beim Zurücksetzen des Modells wieder auf ihren ursprünglichen Startwert gesetzt, womit die Verwendung von CRN voreingestellt ist. Zudem können alle Simulationswerkzeuge Standardzufallszahlen in alle praxisrelevanten Verteilungen transformieren.

AnyLogic ist in Java geschrieben und nutzt die Klasse `java.util.Random` zum Erzeugen von Standardzufallszahlen (Borshchev 2013, S. 585 ff.). Standardmäßig verwendet AnyLogic für jede Zufallsgröße denselben Zufallszahlenstrom. Eine Unterstützung für AV existiert nicht. Allerdings erlaubt AnyLogic, die Klasse `Random` durch einen eigenen Zufallszahlengenerator zu ersetzen. Auf diesem Weg können sowohl separate Zufallszahlenströme als auch antithetische Zufallszahlen realisiert werden.

Die übrigen Simulationswerkzeuge unterstützen separate Zufallszahlenströme für die stochastischen Eingangsgrößen eines Modells. Die manuelle Verwaltung der Ströme ist in jedem Werkzeug möglich, eine zumindest teilautomatische Verwaltung bieten Automod, Enterprise Dynamics sowie Plant Simulation. Antithetische Zufallszahlen können von Enterprise Dynamics, Witness und Plant Simulation erzeugt werden. Allerdings bieten die Simulationswerkzeuge keine speziellen Funktionen zur statistischen Auswertung antithetischer Simulationsläufe. Im Rahmen dieses Beitrags wird Plant Simulation für die empirische Untersuchung verwendet. Daher soll im Folgenden auf die VRT-relevante Funktionalität dieses Simulationswerkzeugs genauer eingegangen werden.

Plant Simulation verfügt über einen integrierten Zufallszahlengenerator, der zwei MRG kombiniert. Zur Initialisierung der Zufallszahlenströme wird eine Kombination aus einem modellweit gültigen Startwert (Attribut `RandomNumbersVariant` des Ereignisverwalters) und einem objektspezifischen Startwert (Attribut `RandomSeed`) verwendet. Materialfluss- und Variablenbausteine besitzen damit jeweils einen eigenen Startwert. Auch beweglichen Elementen sind Zufallszahlenströme zugeordnet: Die Berechnung der Startwerte erfolgt auf Basis des Klassenattributes `RandomSeed` in Kombination mit der Instanznummer des beweglichen Elements. Für die Abbildung von Störungen von Materialflussbausteinen und beweglichen Elementen wird zusätzlich die Nummer des Störprofils zur Berechnung der Startwerte genutzt. Der Datentyp `RandTime`, der für nutzerdefinierte Attribute und Variablen verwendet werden kann, besitzt ebenfalls ein Attribut `RandomSeed`.

Rüst-, Bearbeitungs- und Erholzeit einer maschinellen Ressource werden in Plant Simulation aus einem einzigen Zufallszahlenstrom bedient. Das ist meist unproblematisch, da die benötigten Werte aus einem Zufallszahlenstrom immer in identischer Reihenfolge pro Baustein gezogen werden. Sollen dennoch unterschiedliche Zufallszahlenströme verwendet werden, so müssen die entsprechenden Zeiten durch Aufruf von SimTalk-Verteilungsfunktionen als Formel für die betrachtete Größe angegeben werden. Dies wäre beispielsweise für die Anwendung von CRN notwendig, wenn zwei Konfigurationen miteinander verglichen werden sollen, von denen eine konstante und die andere stochastische Rüstzeiten beinhaltet.

Die Werte der genannten `RandomSeed`-Attribute werden von Plant Simulation automatisch verwaltet, sodass jede Zufallsgröße standardmäßig einen eigenen Zufallszahlenstrom nutzt. Demgegenüber muss beim Aufruf einer Verteilungsfunktion in der Skriptsprache SimTalk die Nummer eines Zufallszahlenstroms als Parameter

angegeben werden. Der Modellierer muss darauf achten, dass jede Nummer eines Zufallszahlenstroms nur einmal verwendet wird. Wird beispielsweise eine Methode, die den Aufruf einer Verteilungsfunktion enthält, an verschiedenen Stellen im Simulationsmodell aufgerufen, ist sicherzustellen, dass die Stromnummer kontextabhängig festgelegt wird. Die zu den Strömen gehörenden Startwerte sind in einer zentralen Tabelle hinterlegt. Plant Simulation generiert automatisch für jede verwendete Stromnummer einen eigenen Startwert in dieser Tabelle, der bei Bedarf vom Modellierer überschrieben werden kann.

4 Empirische Untersuchung

4.1 Voruntersuchung

AV und CRN beruhen auf der Kontrolle der Zufallszahlen und ihrer Verwendung im Simulationsmodell. Da die meisten stochastischen Eingangsgrößen nicht gleichverteilt sind, müssen Standardzufallszahlen in andere Verteilungen transformiert werden. Insbesondere im Hinblick auf AV sind unterschiedliche Verteilungen in Plant Simulation keineswegs „gleichwertig“, wie Abbildung 1 illustriert: Die Diagramme der oberen Reihe zeigen die Dichtefunktionen von vier Verteilungen. Die Diagramme der unteren Reihe visualisieren jeweils 100 antithetische Zufallszahlenpaare, die für die entsprechende Verteilung generiert wurden.

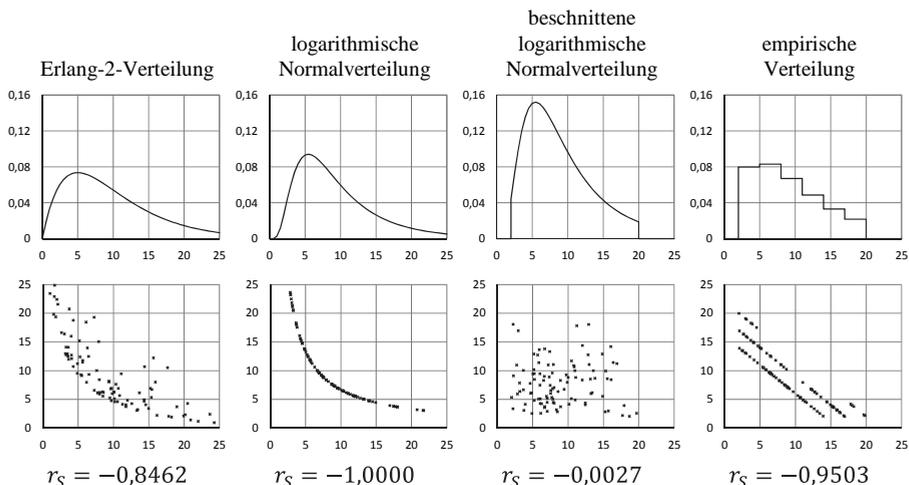


Abbildung 1: Dichtefunktionen und Korrelation antithetischer Zufallszahlen

AV setzt voraus, dass antithetische Variablen negativ korreliert sind. Wie Abbildung 1 zeigt, ist es nicht für alle Verteilungen möglich, das mit hoher Güte zu realisieren. Zuerst wird die Erlang- k -Verteilung betrachtet, die sich besonders zur Modellierung von Bearbeitungs- und Reparaturzeiten eignet. Für die 100 generierten Paare antithetischer Zufallszahlen beträgt der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman $-0,8462$, sodass ein Teil des Effektes, auf dem AV beruht, bereits bei der Erzeugung Erlang- k -verteilter Zufallszahlen verlorengeht. Demgegenüber beträgt der Rang-

korrelationskoeffizient für antithetisch lognormalverteilte Zufallszahlen exakt $-1,0$, auch wenn der Zusammenhang klar nicht-linear ist. Wird die Verteilung durch untere und obere Schranken beschnitten – was in vielen Modellen erfolgt – sind die Zufallszahlenpaare praktisch gar nicht mehr korreliert. Ursache dafür ist die Tatsache, dass zum Erzeugen der antithetischen Zufallszahlen eine unterschiedliche Anzahl von Standardzufallszahlen verwendet wird. Damit geht die Synchronisation zwischen den antithetischen Simulationsläufen verloren und hohe Werte im ersten Lauf führen nicht mehr zwangsläufig zu niedrigen Werten im korrespondierenden Lauf. Von AV ist daher kein Nutzen zu erwarten. Für die empirische Verteilung sind antithetische Zufallszahlenpaare hingegen stark negativ korreliert.

4.2 Fallbeispiele

Die beiden VRT werden auf vier verschiedene Simulationsmodelle unterschiedlicher Komplexität angewandt (Abb. 2). Die Modelle repräsentieren

- ein einfaches Bedienungssystem vom Typ $M/M/1$,
- eine Werkstattfertigung (Law 2007, S. 140 ff.),
- eine Karosseriebauanlage (Spieckermann et al. 2000) sowie
- ein automatisiertes Lager- und Kommissioniersystem.

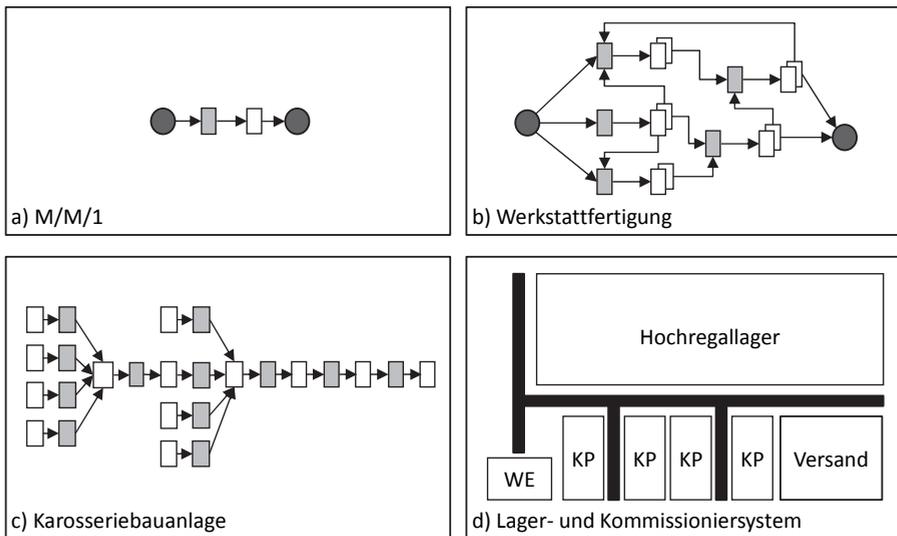


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Layouts der vier Anwendungsbeispiele

Das erste Beispiel ist ein $M/M/1$ -System (Gross et al. 2008, S. 53 ff.) mit einer mittleren Bedienungszeit von 8 min sowie einer mittleren Zwischenankunftszeit von 9 min bzw. 10 min. Beobachtungsgröße ist die mittlere Wartezeit. Zur Untersuchung von CRN werden jeweils 100 Simulationsläufe über einen Zeitraum von 24 Stunden für beide Konfigurationen durchgeführt, und zwar sowohl mit unabhängigen als auch mit gemeinsamen Zufallszahlen. Daraus resultieren jeweils 100 Differenzen der mittleren Wartezeit über den Simulationsraum. Durch CRN konnte die Standardabweichung dieser Differenz um 59,7 % reduziert werden. Um die Effizienz von AV

zu ermitteln, werden für beide Konfigurationen 100 unabhängige Simulationsläufe sowie 50 Paare antithetischer Läufe durchgeführt. Bei einer Zwischenankunftszeit von 9 min reduziert AV die Standardabweichung der Wartezeit um 41,2 %, bei einer Zwischenankunftszeit von 10 min um 37,0 %.

Das zweite Beispiel ist der Literatur entnommen (Law 2007, S. 140 ff.): Eine *Werkstatt* umfasst fünf Arbeitsstationen AS1, ..., AS5, die jeweils aus mehreren identischen Maschinen bestehen. Jede Arbeitsstation besitzt eine FIFO-Warteschlange unbeschränkter Kapazität. Produktionsaufträge treffen mit exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten in der Werkstatt ein. Es gibt drei Auftragsstypen mit spezifischen relativen Häufigkeiten und Arbeitsplänen. Im originalen Modell sind die Bearbeitungszeiten Erlang-2-verteilt. Aufgrund der in Abschnitt 4.1 dargelegten Ergebnisse wird zusätzlich eine Konfiguration mit logarithmisch normalverteilten Bearbeitungszeiten verwendet. Die Verteilungsparameter sind dabei so gewählt, dass die Erlang-2-Verteilung bestmöglich approximiert wird. Für die Werkstatt werden die beschriebene Konfiguration sowie fünf weitere Konfigurationen mit jeweils einer zusätzlichen Maschine in einer der Arbeitsstationen simuliert. Der Simulationszeitraum beträgt 365 Tage, die Anzahl der Replikationen 100. Beobachtungsgröße ist die mittlere Durchlaufzeit aller Aufträge. Für die Bearbeitungszeiten an den fünf Arbeitsstationen wird jeweils ein Zufallszahlenstrom verwendet. Zur Abbildung des Ankunftsprozesses könnte eine Quelle für alle Auftragsstypen benutzt werden. Das entspräche zwei Zufallszahlenströmen, von denen einer die Zwischenankunftszeiten und der andere den Auftragsstyp bestimmt. Dann wäre die Wirkung des zweiten Zufallszahlenstroms auf die Beobachtungsgröße Durchlaufzeit aber nicht mehr monoton. Deshalb wird für jeden Auftragsstyp eine eigene Quelle mit eigenem Zufallszahlenstrom zur Steuerung der Zwischenankunftszeiten verwendet. Tabelle 2 zeigt die mit CRN erzielte Varianzreduktion (prozentuale Verringerung der Breite des Paired-*t*-Konfidenzintervalls für die Verkürzung der mittleren Durchlaufzeit). In vier von fünf Fällen ist die Reduktion beträchtlich, im Fall einer zusätzlichen Maschine in AS2 jedoch gering bzw. sogar negativ: Durch die neue Maschine in AS2 verschiebt sich der Engpass der Werkstatt. Deshalb unterscheiden sich in dieser Konfiguration die Abarbeitungsreihenfolge der Aufträge und damit die Verwendung der Zufallszahlen deutlich von der Ausgangskonfiguration, was die geringe Wirksamkeit von CRN erklärt.

Tabelle 2: Varianzreduktion mit CRN für das Beispiel „Werkstattfertigung“

Verteilung der Bearbeitungszeiten	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5
logarithmische Normalverteilung	87,26 %	-1,62 %	87,57 %	73,47 %	86,90 %
Erlang-2-verteilung	86,15 %	8,94 %	88,94 %	77,23 %	85,22 %

Zur Untersuchung der Wirkung von AV werden 200 unabhängige Simulationsläufe mit 100 Paaren antithetischer Läufe verglichen. Betrachtet wird die Ausgangskonfiguration des Systems. Bei logarithmisch normalverteilten Bearbeitungszeiten wird eine Varianzreduktion von 43,17 % erreicht, bei Erlang-2-verteilten Bearbei-

tungszeiten eine Reduktion von 37,10 %. Analog zu den Ergebnissen aus Abschnitt 4.1 eignet sich die Erlang-2-Verteilung auch hier weniger gut für AV als die logarithmische Normalverteilung.

Das dritte Beispiel, das von Spieckermann et al. (2000) ausführlich beschrieben wird, ist eine *Karosseriebauanlage* (Abb. 2). Die Bearbeitungszeiten werden hier als konstant und die Störungen als stochastisch angenommen. Beobachtungsgröße ist der Durchsatz der Anlage. Es werden zwei Experimente mit jeweils 500 Replikationen pro Konfiguration durchgeführt. Im ersten Experiment (Änderung des mittleren Störabstands in einem Block) liegt die Standardabweichung der Änderung des Karosseriedurchsatzes bei 7,09 Einheiten im Vergleich zu 20,35 Einheiten bei voneinander unabhängigen Simulationsläufen. Bezogen auf das Paired-*t*-Konfidenzintervall mit $\alpha = 0,01$ kann so nach 12 Simulationsläufen ein signifikanter Unterschied in der Beobachtungsgröße „Durchsatz“ festgestellt werden, während diese Aussage ohne CRN erst nach 74 Läufen getroffen werden kann. Das Experiment zur Untersuchung von AV führt zu den in Tabelle 3 gezeigten Ergebnissen. Neben der Korrelation zwischen den Beobachtungsgrößen aus antithetischen Replikationen ist die erzielte Reduktion der Breite des Konfidenzintervalls für den mittleren Durchsatz angegeben. Wie die Ergebnisse der Voruntersuchung erwarten lassen, verhindert das Beschneiden der Erlang-*k*-Verteilung die Wirksamkeit von AV.

Tabelle 3: Varianzreduktion mit AV für das Beispiel „Karosseriebauanlage“

Verteilung der Stördauern und Störabstände	Korrelationskoeffizient	Reduktion der Breite des Konfidenzintervalls
Erlang- <i>k</i> -Verteilung	-0,24	12,86 %
beschnittene Erlang- <i>k</i> -Verteilung	0,04	-2,19 %
empirische Verteilung	-0,21	10,86 %

Das im vierten Beispiel betrachtete *Lager- und Kommissioniersystem* der Firma Hettich in Kirchlengern ist typisch für weitgehend automatisierte Ware-zum-Mann-Systeme. Die Bevorratung der Artikel erfolgt auf Paletten in einem Hochregallager. Neben Vollausslagerungen, die direkt dem Versandbereich zugeführt werden, sind Kundenaufträge an ortsfesten Kommissionierplätzen zu kommissionieren. Hierzu werden die sogenannten Zielpaletten an diesen Plätzen vorbereitet und die benötigten Quellpaletten aus dem Hochregallager sequentiell über ein Pull-System angefordert. Die Zeit für die Bearbeitung eines Kommissionierauftrags setzt sich aus mehreren dreiecksverteilten Zeitanteilen zusammen (Vorbereiten der Zielpalette, Picken pro Quellpalette, Fertigstellen der Zielpalette), wobei ein Auftrag in einzelnen Fällen über 100 Quellpaletten erfordern kann. Für die Bewertung des Einsatzes von VRT werden drei Ansätze zur Zuordnung von Zufallszahlenströmen zu den Zufallsgrößen betrachtet:

- a. Alle Kommissionierplätze nutzen denselben Zufallszahlenstrom.
- b. Jeder Kommissionierplatz erhält einen Zufallszahlenstrom.
- c. Jeder Kommissionierplatz erhält pro Tätigkeitstyp (Vorbereitung der Zielpalette, Picken, Abschluss der Zielpalette) einen Zufallszahlenstrom.

Untersucht werden zwei Systemkonfigurationen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Kommissionierplätzen. Unterschiede in der Beobachtungsgröße „Durchsatz an Zielpaletten“ sind bereits für sehr wenige unabhängige Simulationsläufe nachweisbar (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,01$). Die empirische Standardabweichung der Differenz des Palettendurchsatzes lässt sich durch Nutzung von CRN für den Fall b) in Relation zu Fall a) nicht verringern. Nur im Vergleich von Fall c) zu Fall a) ergibt sich ein positiver Effekt, wobei sich die Standardabweichung um 13,9 % reduziert. Auch für AV können in den Fällen a) und b) keine signifikanten positiven Effekte festgestellt werden: Für den Fall b) liegt der Korrelationskoeffizient lediglich bei -0,012 bei 500 Beobachtungspaaren. Der Korrelationskoeffizient für den Fall c) ist mit einem Wert von -0,09 betragsmäßig etwas höher, womit sich die Anzahl notwendiger Simulationsläufe aber nur geringfügig reduzieren lässt.

5 Zusammenfassung und Hinweise für die Modellierung

Zusammenfassend zeigt Tabelle 4 einige Ergebnisse, die mit den beiden VRT erzielt wurden. Als Maß für die Varianzreduktion wird für CRN die prozentuale Verringerung der Breite des Paired-*t*-Konfidenzintervalls und bei AV die prozentuale Verringerung der Standardabweichung der Ausgangsgröße verwendet. Für AV wird außerdem der Korrelationskoeffizient der Beobachtungsgröße für die korrespondierenden Folgen antithetischer Simulationsläufe angegeben.

Tabelle 4: Empirische Ergebnisse

	CRN Varianzreduktion	AV Korrelation	AV Varianzreduktion
MM/1-System	59,7 %	-0,42	41,20 %
Werkstattfertigung	87,3 %	-0,40	86,15 %
Karosseriebauanlage	65,2 %	-0,24	12,86 %
Lager- und Kommissioniersystem	13,9 %	-0,09	4,70 %

Tendenziell kommen die Effekte der VRT umso weniger zum Tragen, je komplexer das Simulationsmodell ist: In den ersten drei Modellen belegen die Aufträge in allen Simulationsläufen stets dieselben Arbeitsstationen, was die synchrone Nutzung der Zufallszahlen in unterschiedlichen Läufen erleichtert. Das letzte, komplexeste Beispiel besitzt diese Eigenschaft nicht, was zur geringeren Effizienz der VRT führt.

Zusammenfassend lassen sich folgende Modellierungshinweise geben:

1. CRN sollte grundsätzlich angewendet werden.
2. Jede Zufallsgröße sollte einen eigenen Zufallszahlenstrom erhalten. In einigen Fällen erfordert dies Eingriffe in die Standardimplementierung von Simulationsbausteinen (siehe Abschnitt 3). Besondere Vorsicht ist bei objektorientierten Modellierungsansätzen geboten: Abgeleitete Klassen und Instanzen, z. B. von Bausteinen, müssen jeweils eigene Zufallszahlenströme erhalten.

3. Für AV sollten bevorzugt Verteilungen verwendet werden, bei denen die negative Korrelation zwischen Paaren antithetischer Zufallszahlen betragsmäßig groß ist (siehe Abschnitt 4 zur Erlang- k -Verteilung).
4. Das Beschneiden von theoretischen Verteilungen sollte für den Einsatz von AV vermieden werden. Gegebenenfalls können beschnittene Verteilungen durch empirische Verteilungen approximiert werden (siehe Abschnitt 4.2).

Die meisten aktuellen Simulationswerkzeuge unterstützen den Einsatz von CRN sehr gut, den von AV nur eingeschränkt. Der Modellierer muss selbst dafür Sorge tragen, dass das Simulationsmodell die für die VRT erforderlichen strukturellen Eigenschaften besitzt. Dazu benötigt er sowohl ein grundlegendes Verständnis der VRT als auch fundiertes Wissen über relevante Implementierungsdetails des Simulationswerkzeugs, insbesondere über den Umgang mit Zufallszahlenströmen und deren Verwendung.

Literatur

- Adewunmi, A.: Selection of simulation variance reduction techniques through a fuzzy expert system. PhD thesis, University of Nottingham, 2010.
- Borshchev, A.: The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America, 2013.
- Bratley, P.; Fox, B. L.; Schrage, L.: A Guide to Simulation. New York: Springer 1983.
- Cole, G.P.; Johnson, A.W.; Miller, J.O.: Feasibility Study of Variance Reduction in the Logistics Composite Model. In: Henderson, S.G.; Biller, B.; Hsieh, M.-H.; Shortle, J.; Tew, J.D.; Barton, R.R.: Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, 2007, S. 1410-1416.
- Gross, D.; Shortle, J.F.; Thompson, J.M.; Harris, C.M.: Fundamentals of Queueing Theory. 4th ed., Hoboken: Wiley 2008.
- Hedderich, J.; Sachs, L.: Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R. 15. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2016.
- Kolonko, M.: Stochastische Simulation: Grundlagen, Algorithmen und Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2008.
- Law, A.M.: Simulation Modeling and Analysis. 4th ed., Boston: MacGraw Hill 2007.
- L'Ecuyer, P.: Tables of Linear Congruential Generators of Different Sizes and good lattice structure. Mathematics of Computation 68 (1999) 225, S. 249-260.
- L'Ecuyer, P.; Granger-Piché, J.: Combined generators with components from different families. Mathematics and Computers in Simulation 62 (2003) 3-6, S. 395-404.
- Spieckermann, S.; Gutenschwager, K.; Heinzel, H.; Voß, S.: Simulation-based Optimization in the Automotive Industry – A Case Study on Body Shop Design. Simulation 75 (2000) 5, S. 276-286.
- Ünlü, Y.; Rossetti, M.D.: Evaluating Variance Reduction Techniques within a Sample Average Approximation Method for a Constrained Inventory Policy Optimization Problem. In: Jain, S.; Creasey, R.R.; Himmelspach, J.; White, K.P.; Fu, M.: Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, S. 1629-1640.

Automatisierte Modellverifikation mithilfe einer Äquivalenzprüfung an einem Referenzmodell für einen Einsatz in der Lehre

Automated Model Verification Using an Equivalence Test on a Reference Model for Use in Teaching

Akin Akbulut, Wilhelm Dangelmaier, Universität Paderborn, Paderborn (Germany),
Akbulut@hni.upb.de, Wilhelm.Dangelmaier@hni.upb.de

Christoph Laroque, Westsächsische Hochschule Zwickau, Zwickau (Germany),
Christoph.Laroque@fh-zwickau.de

Abstract: In this article, a cross-tooling method for automated model verification is presented using a reference model. Furthermore, the method is implemented in teaching, using a web platform. The method bases on Yucesan and Schruben (1992), demonstrating a procedure for the examination of a structural and behavioural equivalence of two simulation models based on Simulation Graph models. However, Simulation Graph models are subject to an event-oriented modelling world view. Since current simulation tools use a process-oriented - easier to understand - modelling world view, a simple queuing model shows how transformation from a process-oriented world view (Simio, AnyLogic) takes place in an event-oriented world view (Simulation Graph models). A further step then checks the structural equivalence via an isomorphic mapping on the resulting planar graphs.

1 Einleitung

An der Universität Paderborn wird eine Einführungsveranstaltung zur Modellierung und Simulation von Materialflusssystemen angeboten. Die Veranstaltung richtet sich an die Bachelorstudiengänge der Fakultät Wirtschaftswissenschaften und somit auch an Wirtschaftswissenschaftler und Wirtschaftsingenieure, die keine bis geringe Programmierkenntnisse besitzen. Die Inhalte der Veranstaltung beginnen mit der Theorie zur Modellbildung und schließen mit der Durchführung einer Simulationsstudie in Produktion und Logistik - dies erfordert auch die Implementierung eines Computermodells. Die von den Studierenden durchzuführende Studie beinhaltet eine Beschreibung eines geplanten Fertigungssystems, eine Problemstellung und eine Zielsetzung. Die Auswahl einer Simulationsanwendung, in der das Computermodell implementiert wird, treffen die Studierenden dabei eigenständig. Regelmäßig beobachten die Dozenten, dass Studierende, die in den

Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften verortet sind, problemlos ein adäquates Konzeptmodell für eine vorgegebene Problemstellung erstellen können, jedoch bei der Implementierung eines selbst einfachen Computermodells stark verunsichert sind. Daher werden die Sprechstunden der Dozenten häufig von den Veranstaltungsteilnehmern besucht, um zu besprechen, ob ein Computermodell korrekt ist bzw. ob ein Konzeptmodell korrekt in ein Computermodell transformiert wurde. Da die Simulationsstudie an einem nichtexistierenden Fertigungssystem ohne Ergebnisdaten durchgeführt wird, sind die in der Literatur beschriebenen Verfahren (z. B. Rabe et al. 2008) zur Verifikation und Validierung nur bedingt anwendbar, da Studierende ihre Modellergebnisse (z. B. aus einer Kontrollrechnung) nicht einem Realsystem gegenüberstellen können. Eine Möglichkeit mit den vorhandenen Daten zu prüfen, ob ein Konzeptmodell korrekt in ein Computermodell transformiert wurde, kann über einen Vergleich mit einer Musterlösung bzw. einem Referenzmodell erfolgen. Eine solche manuelle Verifikation stellt jedoch eine zeitaufwendige Prozedur dar, weil die Struktur, alle Funktionen und alle weiteren Attribute beider Modelle miteinander verglichen werden müssen. Dieser Umstand hat zu der Frage geführt, wie ein automatisierter Ansatz für die Modellverifikation aufgebaut sein muss und welche Voraussetzungen gelten müssen, damit eine Methode entsteht, die in der Lehre eingesetzt werden kann. Eine solche Methode muss zwei Computermodelle miteinander vergleichen und eine Aussage treffen, ob beide Modelle ein und dasselbe zugrundeliegende Fertigungssystem modellieren. Da die Studierenden unterschiedliche Simulationsanwendungen benutzen, muss die Methode zusätzlich die Fähigkeit besitzen, Modelle aus zwei unterschiedlichen Simulationsanwendungen miteinander zu vergleichen.

2 Stand der Technik

Eine explizite Prüfung auf Gleichheit von zwei Simulationsmodellen wird in der Literatur als Äquivalenz von Modellen beschrieben und kommt im Zusammenhang mit Abstraktionstechniken für Simulationsmodelle vor. In diesem Kontext wird geprüft, ob ein abstrahiertes Modell immer noch dieselben oder ähnliche Ergebnisse berechnet wie vor einer Abstraktion. Overstreet (1982) differenziert zwei unterschiedliche Äquivalenzen: Eine Äquivalenz der Struktur (bzw. Strukturäquivalenz) und eine externe Äquivalenz. Demnach besteht eine Strukturäquivalenz, wenn die Mengen A und B , durch die zwei Modelle beschrieben werden, identisch sind. Eine externe Äquivalenz besteht, wenn die Eingaben U und die berechneten Ausgaben Y bei zwei Modellen identisch sind. Eine weitere Definition liefert Sargent (1988). Er betrachtet die von den Ereignissen berechneten Ausprägungen der Zustandsvariablen ($S_{e_1}, S_{e_2}, \dots, S_{e_n}$) und die diskreten Zeitpunkte, an denen die Ereignisse auftreten ($T_{e_1}, T_{e_2}, \dots, T_{e_n}$). Sind Ausprägungen und Zeitpunkte für beide Modelle identisch, so besteht nach Sargent eine Verhaltensäquivalenz. Yücesan und Schruben (1992) zeigen wie eine Verhaltensäquivalenz mithilfe von sogenannten Simulationsgraphen nachgewiesen werden kann. Interessant ist, dass der Nachweis über einen Umweg erfolgt. Sie prüfen die Struktur zweier Simulationsgraphen über eine isomorphe Abbildung zwischen zwei Modellen. Existiert eine solche Abbildung, so sind die Modelle strukturäquivalent. In einem nächsten Schritt beweisen sie, dass eine Strukturäquivalenz auch eine Verhaltensäquivalenz impliziert. Außer diesen theoretischen Behandlungen, existiert keine weitere Literatur, die auch eine praktische

Anwendung demonstriert. Um diese Wissenslücke zu schließen, stellen wir eine Methode mit einer Anwendung zur Verifikation von Simulationsmodellen vor, die auf Yücesan und Schruben (1992) aufbaut, um sie im Rahmen der Lehre einzusetzen. Aus diesem Grund soll als nächstes die Modellierungstechnik der Simulationsgraphen vorgestellt werden. Die Methode wird erweitert, sodass Modelle von aktuellen Simulationsanwendungen analysiert werden können, und zusätzlich ein Vergleich von Modellen aus unterschiedlichen Simulationsanwendungen möglich wird.

2.1 Simulationsgraphen

Simulationsgraphen sind eine mathematische Form von Ereignisgraphen, aus diesem Grund wird erst diese Modellierungstechnik erklärt. In Ereignisgraphen werden Simulationsmodelle mithilfe von gerichteten Graphen dargestellt, siehe Abbildung 1 (vgl. Schruben 1983). Ereignistypen werden durch Knoten dargestellt. Jeder Knoten besitzt eigene Zustandsvariablen und steht in Verbindung mit einer Reihe von Zustandsveränderungen, die in den eigenen Variablen durchgeführt werden, sobald ein Knoten aktiviert wird. Der Fokus bei Ereignisgraphen liegt auf den einzelnen Ereignissen in einem zu modellierenden System. Die Entitäten, wie z. B. ein diskreter Materialfluss, werden aus diesem Grund nur implizit dargestellt. Die Relationen zwischen den Ereignissen werden durch gerichtete Kanten zwischen zwei Knoten dargestellt. Kanten können logische und zeitliche Ausdrücke besitzen. Ein logischer Ausdruck (i) bestimmt die Bedingungen, die erfüllt werden müssen, damit eine Kante passiert werden kann. Ein zeitlicher Ausdruck t beschreibt, wie viel Zeit vergeht, wenn eine Kante passiert wird. Der abgebildete Ereignisgraph lässt sich wie folgt interpretieren: Immer wenn ein Ereignis A stattfindet und wenn die Bedingung (i) erfüllt ist, dann wird das Ereignis B in t Zeiteinheiten eingeplant.

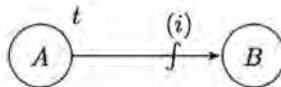


Abbildung 1: Aufbau eines Ereignisgraphen

Schruben beschreibt Simulationsgraphen als eine explizit mathematische Form von Ereignisgraphen und definiert sie als $S = (F, C, T, \Gamma, G)$. Die ersten vier Mengen F, C, T, Γ definieren die Entitäten in einem Simulationsgraphen und damit das explizite Modellverhalten. Diese werden durch F die Ereignisfunktionen, C die Bedingungen, T die Zeitverzögerungen und Γ die Ausführungsprioritäten dargestellt. Der gerichtete Graph G als geordnetes Triple $(V(G), E(G), \Psi_G)$ beschreibt die Struktur eines Simulationsgraphen mit $V(G)$, um die Ereignisknoten zu beschreiben, $E(G)$, um die Kanten zu beschreiben, und der Menge Ψ_G , um die Verbindungen von Quellknoten nach Zielknoten zu beschreiben (s. Yücesan und Schruben 1992).

3 Transformation

Die Herausforderung bei einer Transformation liegt darin, dass ein Modell von einem Modellierungsparadigma in ein anderes Modellierungsparadigma übersetzt wird. Aktuelle Simulationswerkzeuge, wie z. B. AnyLogic und Simio, beschreiben Modelle

mithilfe von Prozessbausteinen. Eine Komponente in so einem Modell ist ein vollständiger Prozess, wie z. B. eine Montagezelle, die einen Montageprozess darstellt. Dieses Modellierungskonzept wird als prozessorientierte Weltsicht bezeichnet. Simulationsgraphen hingegen verwenden eine ereignisorientierte Weltsicht. Eine Modellkomponente in einem solchen Graphen stellt ein einzelnes Ereignis dar, wie z. B. eine „Ankunft von Material an einer Montagezelle“ (Law und Kelton 2000). Ein Prozess besteht i. d. R. aus vielen einzelnen Ereignissen, und so kann der Prozess „Montagezelle“ in der ereignisorientierten Weltsicht durch die Ereignisse „Ankunft von Material an Montagezelle“, „Bearbeitungsbeginn in Montagezelle“ und „Bearbeitungsende in Montagezelle“ beschrieben werden. Dies ist nur eine von vielen Möglichkeiten, einen Prozess über seine Ereignisse darzustellen. Die Information darüber, welche Ereignisse tatsächlich in einem Prozess zusammengefasst werden, liegt in den Ereignislisten in den jeweiligen Simulationswerkzeugen (zur Laufzeit) verborgen. Da AnyLogic und Simio keine Möglichkeiten bieten, ihre Ereignislisten zu analysieren, wird in dieser Arbeit manuell festgelegt, welche Ereignistypen hinter einem Prozesstyp verborgen liegen (s. Tabelle in Abb. 2). Die Tabelle wird anhand nachfolgendem Schema aufgebaut: Kann ein Prozesstyp eine Restriktion bezüglich ihrer Ressourcen besitzen (z. B. Ressourcen müssen in ausreichender Qualität und/oder Quantität vorhanden sein, um eine Bearbeitung in einem Prozessblock beginnen zu können), so wird er mit zwei Ereignistypen modelliert (siehe Arbeitsvorgang): ein Ereignistyp für die Ankunft, in der eine Ressource blockiert wird, und ein Ereignistyp für einen Abgang, in der eine Ressource wieder frei gegeben wird. Besitzt ein Prozesstyp eine Restriktion bezüglich seiner Kapazität zur Aufnahme von Entitäten, so wird er mit einem Ereignistypen Ankunft beschrieben (siehe Puffer). Die Prozesstypen Quelle und Senke werden immer mit einem Ereignistypen Ankunft beschrieben.

Prozesstyp	Verhalten	Ereignistyp
Quelle	Entität erzeugen Entität weiterleiten	Ankunft
Senke	Entität entgegennehmen Entität vernichten	Ankunft
Puffer	Entität entgegennehmen & einlagern Entität auslagern & weiterleiten	Ankunft
Arbeitsvorgang	Entität entgegennehmen Ressource binden Zeitverzögerung einplanen Ressource freigeben Entität weiterleiten	Ankunft Abgang

Abbildung 2: Transformation elementarer Prozesstypen in Ereignistypen

Mithilfe dieser Tabelle wird anschließend mit Algorithmus 1 (s. Abb. 3) in drei Stufen der neue Simulationsgraph kreiert. Die Funktionsweise des Algorithmus wird im Folgenden kurz erläutert:

1. *Initialisierung:* Aus einem Ausgangsmodell werden alle Prozessbausteine extrahiert und der Menge K zugewiesen. Alle Verknüpfungen aus dem Ausgangsmodell werden der Menge L zugewiesen. Anschließend werden die Mengen S, F,

C, T, Γ , E, V, G, Z deklariert und mit der leeren Menge initialisiert (Zeilen 1–3). Die Mengen S, F, C, T, Γ , E, V, G werden analog zu der Definition eines Simulationsgraphen gebildet. Die Menge Z hält die Zustandsvariablen eines Modells, die mit den Ereignisfunktionen F im Verlauf eines Simulationsexperiments berechnet werden.

2. *Knoten & lokale Eigenschaften:* Für jeden Prozessbaustein K werden die fest gelegten Ereignisknoten je Typ gebildet. Anschließend werden die lokalen Eigenschaften der Ereignisknoten gebildet und mit den Werten aus einer Modellkomponente parametrisiert. Lokale Eigenschaften sind alle Eigenschaften, die in keiner Beziehung zu einem vor- oder nachgestellten Prozessbaustein stehen (Zeilen 4–25).
3. *Kanten & globale Eigenschaften:* Für jede Verknüpfung L aus dem Ausgangsmodell wird entsprechend eine gerichtete Kante in dem Simulationsgraphen gebildet, um die Relationen korrekt zu übertragen. Nachdem alle Ereignisknoten mit den lokalen Eigenschaften generiert und die Verbindungen untereinander gesetzt wurden, werden in einem letzten Schritt alle Eigenschaften gesetzt, die in einer Abhängigkeit zu einem Vorgänger stehen. Dies betrifft die Ereignisfunktionen, Bedingungen und Zeitverzögerungen, die in Abhängigkeit von einem vorher geschalteten Prozessbaustein gesetzt werden (Zeilen 26–37).

Algorithmus 1 (Abb. 3) ist eine exemplarische Implementierung für AnyLogic. Der Algorithmus folgt den beschriebenen drei Stufen und kann auch für jedes weitere prozessorientierte Simulationswerkzeug in dieser Vorgehensweise programmiert werden. Der Algorithmus baut aus einem Ausgangsmodell einen neuen Simulationsgraphen S auf. Dabei werden die Prozessbausteine Source, Delay, Assembler, Service, Queue und Sink (Process Modeling Library) behandelt.

```

Data: Ausgangsmodell
Result: Simulationsgraph  $\mathcal{S}$ 
1  $K \leftarrow$  Modellkomponenten  $\subseteq$  Ausgangsmodell;
2  $L \leftarrow$  Verknüpfungen  $\subseteq$  Ausgangsmodell;
3  $\mathcal{S}, \mathcal{F}, \mathcal{C}, \mathcal{T}, \Gamma, E, V, G, Z \leftarrow \emptyset$ ;
4 for  $i \leftarrow 1$  to  $|K|$  do
5   switch  $k_i, Typ$  do
6     case Source do
7        $V \leftarrow V \cup \{v_i \leftarrow k_i.Typ\}$ ;
8        $Z \leftarrow Z \cup \{z_{i,x \leftarrow S} \leftarrow 0\}$ ;
9        $E \leftarrow E \cup \{e_i \leftarrow (v_i, v_i)\}$ ;
10       $\mathcal{T} \leftarrow \mathcal{T} \cup \{t_{e_i} \leftarrow k_i.Zeitverzögerung\}$ ;
11       $\mathcal{F} \leftarrow \mathcal{F} \cup \{f_{v_i}\} = \{z_i \leftarrow z_i + k_i.AnkunftMaterialInStk\}$ ;
12     case Delay | Assembler | Service do
13        $V \leftarrow V \cup \{v_{i,x \leftarrow 1} \leftarrow k_i.Typ\} \cup \{v_{i,x \leftarrow 2} \leftarrow k_i.Typ\}$ ;
14        $Z \leftarrow Z \cup \{z_{i,x \leftarrow R} \leftarrow 0\} \cup \{z_{i,x \leftarrow S} \leftarrow 0\}$ ;
15        $E \leftarrow E \cup \{e_{i,x \leftarrow 1} \leftarrow (v_{i,1}, v_{i,2})\}$ ;
16        $E \leftarrow E \cup \{e_{i,x \leftarrow 2} \leftarrow (v_{i,2}, v_{i,1})\}$ ;
17        $\mathcal{T} \leftarrow \mathcal{T} \cup \{t_{e_{i,1}} \leftarrow k_i.Zeitverzögerung\}$ ;
18        $z_{i,R} \leftarrow k_i.RessourcenInStk$ ;
19        $\mathcal{F} \leftarrow \mathcal{F} \cup \{f_{v_{i,1}}\} = \{z_{i,R} \leftarrow z_{i,R} - 1\}$ ;
20        $\mathcal{F} \leftarrow \mathcal{F} \cup \{f_{v_{i,2}}\} = \{z_{i,R} \leftarrow z_{i,R} + 1, z_{i,S} \leftarrow z_{i,S} + 1\}$ ;
21     case Queue | Sink do
22        $V \leftarrow V \cup \{v_i \leftarrow k_i.Typ\}$ ;
23        $Z \leftarrow Z \cup \{z_{i,x \leftarrow R} \leftarrow 0\} \cup \{z_{i,x \leftarrow S} \leftarrow 0\}$ ;
24        $z_{i,R} \leftarrow k_i.KapazitätInStk$ ;
25        $\mathcal{F} \leftarrow \mathcal{F} \cup \{f_{v_i}\} = \{z_{i,S} \leftarrow z_{i,S} + 1\}$ ;
26 for  $j \leftarrow 1$  to  $|L|$  do
27    $E \leftarrow E \cup \{e_{h \leftarrow |E| + 1} \leftarrow (v_x \leftarrow Quelle(l_j), v_y \leftarrow Ziel(l_j))\}$ ;
28 for  $k \leftarrow 2$  to  $|V|$  do
29   switch  $v_k$  do
30     case Delay | Assembler | Service do
31        $\mathcal{F} \leftarrow \mathcal{F} \cup \{f_{v_k}\} = \{z_{k-1,S} \leftarrow z_{k-1,S} - 1\}$ ;
32        $\mathcal{C} \leftarrow \mathcal{C} \cup \{c_{(v_{k-1}, v_k)}\} = \{z_{k-1,R} > 0\}$ ;
33        $\mathcal{C} \leftarrow \mathcal{C} \cup \{c_{(v_{k+1}, v_k)}\} = \{z_{k,R} > 0\}$ ;
34        $k \leftarrow k + 1$ 
35     case Queue | Sink do
36        $\mathcal{F} \leftarrow \mathcal{F} \cup \{f_{v_k}\} = \{z_{k-1,S} \leftarrow z_{k-1,S} - 1\}$ ;
37        $\mathcal{C} \leftarrow \mathcal{C} \cup \{c_{(v_{k-1}, v_k)}\} = \{z_{k,S} < z_{k,R}\}$ ;
38  $G \leftarrow (V, E)$ ;
39  $\mathcal{S} \leftarrow (\mathcal{F}, \mathcal{C}, \mathcal{T}, \Gamma, G)$ ;

```

Abbildung 3: Algorithmus 1 - Transformation in einen Simulationsgraphen

Um das Vorgehen zu verdeutlichen, wird hier ein einfaches Warteschlangenmodell beschrieben, das mit den Werkzeugen AnyLogic und Simio implementiert ist. Beide Implementierungen sollen in Simulationsgraphen transformiert werden. Das Warteschlangenmodell besteht aus einer Materialankunft (x Stück in einem Intervall a), einem Warteraum (Kapazität y Stück) und einer Bedienstation die sequenziell arbeitet (Ressource 1, Bearbeitungszeit s). Ein korrektes Computermodell in dem

Simulationswerkzeug AnyLogic besteht, wie in Abbildung 4 (Links) dargestellt, aus den Prozessbausteinen vom Typ Source, Queue, Delay und Sink.



Abbildung 4: (Links) Modell A – Warteschlangenmodell in AnyLogic; (Rechts) Modell B – Warteschlangenmodell in Simio

Ein solches Modell als Ausgangsmodell für Algorithmus 1 erzeugt einen Simulationsgraphen S_A wie in Abbildung 5 dargestellt wird.

$$\begin{aligned}
 G_A(V) &= \{A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}, \\
 G_A(E) &= \{E_{(A_0, A_1)}, E_{(A_1, A_1)}, E_{(A_1, A_2)}, E_{(A_2, A_3)}, E_{(A_3, A_4)}, E_{(A_4, A_3)}, E_{(A_4, A_5)}\}, \\
 \Psi_A &= \{(A_0, A_1), (A_1, A_1), (A_1, A_2), (A_2, A_3), (A_3, A_4), (A_4, A_3), (A_4, A_5)\}, \\
 \mathcal{F}_A &= \{f_{A_0}; f_{A_1}; f_{A_2}; f_{A_3}; f_{A_4}; f_{A_5}\} = \{z_1 \leftarrow z_1 + x; z_2 \leftarrow z_2 + x, z_1 \leftarrow z_1 - x; \\
 & z_3 \leftarrow 0, z_2 \leftarrow z_2 - 1; z_3 \leftarrow 1, z_4 \leftarrow z_4 + 1; z_5 \leftarrow z_5 + 1, z_4 \leftarrow z_4 - 1\}, \\
 \mathcal{C}_A &= \{C_{(A_1, A_2)}; C_{(A_2, A_3)}; C_{(A_4, A_3)}\} = \{z_2 < y; z_3 > 0; z_2 > 0\}, \\
 \mathcal{T}_A &= \{t_{(A_1, A_1)}; t_{A_3, A_4}\} = \{a, s\}, \\
 \Gamma_A &= \emptyset.
 \end{aligned}$$

Abbildung 5: Darstellung von Modell A als Simulationsgraphen S_A

In dem Simulationswerkzeug Simio besteht ein adäquates Modell aus den Prozessbausteinen Source, Server und Sink (Abb. 4, Rechts). Ein auf Simio angepasster Algorithmus erzeugt einen Simulationsgraphen S_B wie in Abbildung 6 dargestellt wird.

$$\begin{aligned}
 G_B(V) &= \{B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\}, \\
 G_B(E) &= \{E_{(B_0, B_1)}, E_{(B_1, B_1)}, E_{(B_1, B_2)}, E_{(B_2, B_3)}, E_{(B_3, B_4)}, E_{(B_4, B_3)}, E_{(B_4, B_5)}\}, \\
 \Psi_B &= \{(B_0, B_1), (B_1, B_1), (B_1, B_2), (B_2, B_3), (B_3, B_4), (B_4, B_3), (B_4, B_5)\}, \\
 \mathcal{F}_B &= \{f_{B_0}; f_{B_1}; f_{B_2}; f_{B_3}; f_{B_4}; f_{B_5}\} = \{z_1 \leftarrow z_1 + x; z_2 \leftarrow z_2 + x, z_1 \leftarrow z_1 - x; \\
 & z_3 \leftarrow 0, z_2 \leftarrow z_2 - 1; z_3 \leftarrow 1, z_4 \leftarrow z_4 + 1; z_5 \leftarrow z_5 + 1, z_4 \leftarrow z_4 - 1\}, \\
 \mathcal{C}_B &= \{C_{(B_1, B_2)}; C_{(B_2, B_3)}; C_{(B_4, B_3)}\} = \{z_2 < y; z_3 > 0; z_2 > 0\}, \\
 \mathcal{T}_B &= \{t_{(B_1, B_1)}; t_{(B_3, B_4)}\} = \{a, s\}, \\
 \Gamma_B &= \emptyset.
 \end{aligned}$$

Abbildung 6: Darstellung von Modell B als Simulationsgraphen S_B

4 Äquivalente Simulationsmodelle

Zwei Simulationsgraphen $S_A = (F_A, C_A, T_A, \Gamma_A, G_A)$ und $S_B = (F_B, C_B, T_B, \Gamma_B, G_B)$ sind isomorph zueinander $S_A \approx S_B$, wenn eine bijektive Abbildung zwischen S_A und S_B wie folgt existiert (Yücesan und Schruben 1992):

$$\begin{aligned}
 \Theta : V(G_A) &\rightarrow V(G_B) & \Lambda : \mathcal{F}_A &\rightarrow \mathcal{F}_B & \chi : \mathcal{T}_A &\rightarrow \mathcal{T}_B \\
 \Phi : E(G_A) &\rightarrow E(G_B) & \Omega : \mathcal{C}_A &\rightarrow \mathcal{C}_B & \Delta : \Gamma_A &\rightarrow \Gamma_B
 \end{aligned}$$

Abbildung 7: Bijektive Abbildung zwischen S_A und S_B

Die Abbildungen Θ , Φ , Λ , Ω , χ , Δ formen zusammen eine Isomorphie zwischen den Simulationsgraphen S_A und S_B . Die ersten zwei Abbildungen Θ und Φ prüfen eine Übereinstimmung in der Struktur zwischen den Knoten und Kanten der Graphen. Als nächstes werden die verbleibenden vier Abbildungen im Detail erklärt.

Die Abbildung $\Lambda: F_A \rightarrow F_B$ prüft eine Übereinstimmung zwischen den Ereignisfunktionen, die für die Berechnung der Systemzustände verantwortlich sind. Damit zwei Ereignisfunktionen als gleichwertig eingestuft werden, müssen ihre Berechnungen identische Ergebnisse liefern. In den Fällen, in denen eine Funktion eine stochastische Komponente besitzt, müssen die generierten Zufallszahlen nicht identisch sein, sie müssen jedoch identischen stochastischen Verteilungen unterliegen.

Die Abbildung $\Omega: C_A \rightarrow C_B$ prüft eine Übereinstimmung zwischen den Bedingungen von zwei unterschiedlichen Modellen. Dabei müssen die Bezeichnungen für die Ausdrücke und die binären Operatoren für die Bedingungen in den unterschiedlichen Simulationsgraphen nicht identisch sein. Wichtig ist ausschließlich, dass die Bedingungen identische booleschen Werte annehmen, sobald in zwei unterschiedlichen Simulationsgraphen ein identischer Modellzustand vorliegt.

Die Abbildung $\chi: T_A \rightarrow T_B$ prüft, ob eine Übereinstimmung zwischen den Verzögerungszeiten vorliegt. Wenn die Verzögerungszeiten deterministisch sind, müssen sie in den unterschiedlichen Modellen identisch sein. Wenn die Verzögerungszeiten stochastisch sind, muss sichergestellt werden, dass sie denselben stochastischen Verteilungen unterliegen, damit sie als gleichwertig eingestuft werden können.

Die Abbildung $\Delta: \Gamma_A \rightarrow \Gamma_B$ prüft eine Übereinstimmung zwischen den Ausführungsprioritäten. Da die Ausführungsprioritäten in dieser Arbeit nicht beachtet werden, sind beide Mengen leer.

Allgemein ist hinzuzufügen, dass für die Prüfung einer Isomorphie zwischen zwei Graphen derzeit kein effizienter Algorithmus bekannt ist (Deiser et al. 2016). Simulationsgraphen stellen jedoch planare Graphen dar, d. h. diese Graphen können auf einer Ebene dargestellt werden, ohne dass sich Kanten schneiden (Yücesan 1989). Für die Prüfung einer Isomorphie bei planaren Graphen werden in der Literatur unterschiedliche Algorithmen vorgestellt. Die hier vorgestellte Implementierung (s. Abb. 8) orientiert sich an der theoretischen Beschreibung. Die Simulationsgraphen werden erst dahingehend geprüft, ob sie planar sind, und dann wird geprüft, ob eine isomorphe Abbildung zwischen ihnen besteht. Hierzu wird die Methode verwendet, wie sie von Kukluk et al. (2004) vorgestellt wird. Wenn die Abbildungen Θ und Φ hergestellt werden können, liefert die Funktion *checkIsomorphism* eine positive Rückmeldung. Anschließend werden die Mengen F , C , T und Γ auf Übereinstimmung geprüft. Hierzu werden alle Zuweisungen (\leftarrow) und binäre Operationen ($+$, $-$, $<$, $=$, $>$) geprüft, ob sie in gleicher Anzahl in beiden Mengen existieren. Trifft dies zu, so gibt die Funktion *equals* eine positive Rückmeldung. Der Algorithmus 2 (s. Abb. 8) gibt nach Abschluss fünf boolesche Variablen aus. Erst wenn alle Variablen den Wert „true“ enthalten, so ist eine Prüfung vollständig und erfolgreich abgeschlossen.

Data: Simulationsgraph \mathcal{S}_A , Simulationsgraph \mathcal{S}_B
Result: Boolean, Boolean, Boolean, Boolean, Boolean

```

1 a, b, c, d, e  $\leftarrow$  false;
2 a  $\leftarrow$  checkIsomorphism( $G(\mathcal{S}_A), G(\mathcal{S}_B)$ );
3 b  $\leftarrow$  equals( $\mathcal{F}(\mathcal{S}_A), \mathcal{F}(\mathcal{S}_B)$ );
4 c  $\leftarrow$  equals( $\mathcal{C}(\mathcal{S}_A), \mathcal{C}(\mathcal{S}_B)$ );
5 d  $\leftarrow$  equals( $\mathcal{T}(\mathcal{S}_A), \mathcal{T}(\mathcal{S}_B)$ );
6 e  $\leftarrow$  equals( $\Gamma(\mathcal{S}_A), \Gamma(\mathcal{S}_B)$ );
7 return a, b, c, d, e

```

Abbildung 8: Isomorphie Simulationsgraphen

Wenn Modell A und Modell B in separate Simulationsgraphen \mathcal{S}_A und \mathcal{S}_B transformiert sind, kann mit Algorithmus 2 geprüft werden, ob eine isomorphe Abbildung zwischen beiden Modellen hergestellt werden kann (s. Abb. 8). Nachdem eine isomorphe Abbildung zwischen \mathcal{S}_A und \mathcal{S}_B identifiziert werden konnte, wird angenommen, das Modell A und Modell B struktur- und verhaltensäquivalent sind.

5 Implementierung und Einbettung in eine Webplattform für eine Anwendung in der Lehre

Die Methode wird als Anwendung implementiert und in eine Webplattform integriert. Der Aufbau entspricht einer klassischen SaaS (Software as a Service) Architektur, wie sie in Abbildung 6 dargestellt wird. Studierende können auf der Plattform über einen Browser auf unterschiedliche Aufgabenstellungen zugreifen. Jede dieser Aufgabenstellungen besteht aus einer fiktiven Beschreibung eines Fertigungssystems, einer Problemstellung, einer Zielsetzung und einem Referenzmodell. Das Referenzmodell stellt eine Musterlösung dar, auf die die Studierenden jedoch keinen Zugriff erhalten. Die Auswahl einer Simulationsanwendung, in der ein Computermodell implementiert wird, treffen die Studierenden eigenständig.

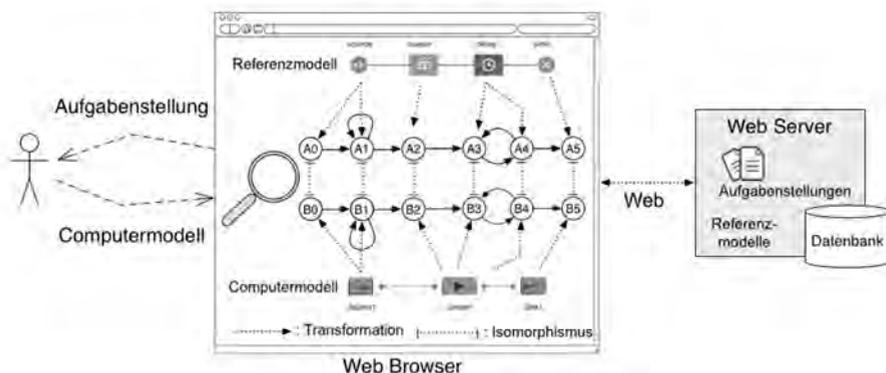


Abbildung 9: Aufbau der Implementierung

Die Studierenden werden aufgefordert für eine Aufgabenstellung ein Computermodell zu implementieren und nach der Fertigstellung abzuspeichern. Ein so gespeichertes Computermodell wird für die Verifikation in die Web-Plattform hochgeladen und mit einem XML-Parser eingelesen. Das eingelesene Modell wird mit dem Algorithmus 1 in einen Simulationsgraphen transformiert. Mit Algorithmus 2 wird das Modell mit einem Referenzmodell aus einer Datenbank auf eine bestehende isomorphe Abbildung geprüft. Die Algorithmen werden dabei clientseitig ausgeführt, dazu kommt die Programmiersprache JavaScript zum Einsatz. Sobald eine Isomorphie identifiziert werden kann ($S_A \approx S_B$), wird angenommen, dass Modell A und Modell B strukturäquivalent sind. Da Yücesan und Schruben (1992) gezeigt haben, dass aus einer Strukturäquivalenz auch eine Verhaltensäquivalenz folgt, wird angenommen, dass so identifizierte Simulationsmodelle zur Laufzeit dieselben Ergebnisse Y bei denselben Eingaben U berechnen – ergo ein Computermodell für eine vorgegebene Aufgabenstellung korrekt implementiert ist.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine werkzeugübergreifende Methode zur automatisierten Modellverifikation mithilfe eines Referenzmodells vorgestellt und gezeigt, wie die Methode mit einer Web-Plattform in der Lehre eingesetzt werden kann. Für diese Methode greifen wir auf die Arbeit von Yücesan und Schruben (1992) zurück, in der basierend auf Simulationsgraphen ein Vorgehen für die Prüfung einer Struktur- und Verhaltensäquivalenz von zwei Simulationsmodellen demonstriert wird.

Literatur

- Deiser, O.; Lasser, C.; Vogt, E.; Werner, D.: 12 x 12 Schlüsselkonzepte zur Mathematik - Diskrete Mathematik. Berlin, Heidelberg: Springer 2016.
- Kukluk, J.P.; Holder, L.B.; Cook, D.J.: Algorithm and experiments in testing planar graphs for isomorphism. *J. Graph Algorithms Appl.* 8 (2004), 2, S. 313–356.
- Law, A.M.; Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*. 3. McGraw-Hill, 2000.
- Overstreet, C.M.: *Model Specification and Analysis for Discrete Event Simulation*. Blacksburg, Virginia, Virginia Tech., Diss., 1982.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik - Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin: Springer 2008.
- Sargent, R.G.: Event Graph Modeling for Simulation with an Application to Flexible Manufacturing Systems. *Management Science* 34 (1988) 10, S. 1231–1251.
- Schruben, L.: Simulation Modeling with Event Graphs. *Commun. ACM* 26 (1983) 11, S. 957–963.
- Yücesan, E.; Schruben, L.: Structural and Behavioral Equivalence of Simulation Models. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 2 (1992) 1, S. 82–103.
- Yücesan, E.: *Simulation graphs for the design and analysis of discrete event simulation models*. Ithaca, N.Y., Cornell University, Diss., 1989.

Mesoskopische Simulationsmodelle in der Produktions- und Logistikplanung

Mesoscopic Simulation Models for Production and Logistics Planning

Tobias Reggelin, Sebastian Lang, David Weigert, Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg, Magdeburg (Germany), tobias.reggelin@ovgu.de,
sebastian.lang@ovgu.de, david.weigert@ovgu.de

Christian Schauf, Volkswagen AG, Wolfsburg (Germany),
christian.schauf@volkswagen.de

Abstract: This paper describes and evaluates the application of mesoscopic discrete-rate based simulation models for typical production and logistics planning tasks in the automotive industry. In terms of level of detail, mesoscopic simulation models fall between object based discrete-event simulation models and flow based continuous simulation models. Mesoscopic models represent logistics flow processes on an aggregated level through piecewise constant flow rates by applying the discrete-rate simulation paradigm instead of modelling individual flow objects. This leads to a fast model creation and computation.

1 Einleitung

Ereignisdiskrete Simulationsmodelle sind die in der Ablaufsimulation in Produktion und Logistik am häufigsten genutzten Simulationsmodelle und Stand der Technik in der Produktions- und Logistikplanung in der Automobilindustrie (vgl. Huber und Wenzel 2011). Das Paradigma der ereignisdiskreten Simulation wird gern genutzt, da ein Großteil der logistischen Prozesse ebenfalls diskreter Natur sind (Scholz-Reiter et al. 2007). Der Begriff diskrete ereignisorientierte Simulation in der Logistik basiert auf dem Konzept von Objekten, Ressourcen und Flussdiagrammen, die den Objektfluss und die Ressourcennutzung beschreiben (Borshchev und Filippov 2004). Aufgrund der Möglichkeit, einzelne logistische Objekte abzubilden, können ereignisdiskrete Simulationsmodelle logistische Systeme in beliebiger Detailliertheit darstellen und werden oft als mikroskopische Modelle umgesetzt (Borshchev und Filippov 2004; Pierreval et al. 2007).

In der deutschen Automobilindustrie ist Plant Simulation das Standardwerkzeug für ereignisdiskrete Simulationsmodelle. Eine Umfrage in der Automobilindustrie mit 29 teilnehmenden Produktionsplanern (Schauf 2016) zeigt, dass 96,6 % der Produktionsplaner die Nutzung von Simulationsmodellen in der Planung entweder für

‚unbedingt notwendig‘, ‚sehr wichtig‘ oder ‚wichtig‘ halten. Nur 3,4 % der Produktionsplaner halten die Simulation für ‚weniger wichtig‘. Die wesentlichen Anforderungen der Produktionsplaner an ein Simulationsmodell sind nach Schauf (2016) in der folgenden Reihenfolge:

1. eine hohe Ergebnisqualität,
2. eine schnelle Ergebnisbereitstellung,
3. Transparenz,
4. eine einfache Konfiguration und
5. die Bedienbarkeit durch den Fachplaner.

Wirft man einen Blick auf die Realität des Simulationseinsatzes in der Produktionsplanung in der Automobilindustrie, so lässt sich feststellen, dass Simulationsstudien oft eine lange Dauer haben. Mehr als 60 % der Simulationsstudien dauern länger als einen Monat und 30 % der Simulationsstudien sogar länger als sechs Monate (Schauf 2016). Das widerspricht dem Wunsch der Produktionsplaner nach einer schnellen Ergebnisbereitstellung.

Ein Grund für die hohen Zeitdauern von Simulationsstudien kann die Verwendung ereignisdiskreter Simulationsmodelle sein, da größere ereignisdiskrete Modelle mit vielen Flussobjekten oder Modelle, deren Detaillierungsgrad zu hoch gewählt ist, mit einem hohen Aufwand für die Modellerstellung und -berechnung verbunden sein können (vgl. Kuhn und Rabe 1998, S. 3; Law und Kelton 2007, S. 2; Feldmann und Reinhart 2000, S. 22; Scholz-Reiter et al. 2008, S. 118; Kosturiak und Gregor 1995, S. 65ff.; Huber und Dangelmaier 2009).

Ein möglicher Lösungsansatz, um die hohen Zeitdauern einer Simulationsstudie zu verkürzen, kann demnach darin liegen, mit weniger detaillierten Simulationsmodellen zu arbeiten. Ein möglicher Ansatz, Planungsaufgaben in Produktion und Logistik mit mesoskopischen Simulationsmodellen zu unterstützen wird von Schenk et al. (2009), Reggelin (2011), Reggelin und Tolujew (2011) und Hennies et al. (2014) beschrieben. Die beschriebenen mesoskopischen Simulationsmodelle basieren im Wesentlichen auf der discrete-rate Simulation (Krahl 2009; Damiron und Nastasi 2008).

Der geringere Detaillierungsgrad in mesoskopischen Modellen kann zu ungenaueren Simulationsmodellen führen. In der Befragung von Schauf (2016) wurden die Produktionsplaner nach der zulässigen Fehlertoleranz einer Simulationsstudie befragt (Abb. 1). Die Fehlertoleranz sinkt mit Dauer der Simulationsstudie. Bei kurzen Simulationsstudien, die weniger als einen Tag bzw. weniger als eine Woche benötigen, akzeptieren Produktionsplaner eine Fehlertoleranz von 7,5 % bzw. 5 %. Bei Simulationsstudien mit bis zu sechs Monaten Dauer werden noch 2 % Fehler akzeptiert. Das kann bedeuten, dass Produktionsplaner durchaus bereit wären, mit Modellen zu arbeiten, die nicht so detailliert sind, dafür aber weniger Zeit für Modellerstellung und -berechnung benötigen.

Ereignisdiskrete Simulationsmodelle mit der Simulationssoftware Plant Simulation lassen jedoch nur bis zu einem gewissen Grad Vereinfachungen und Abstraktionen zu, da Plant Simulation auf die Erstellung ereignisdiskreter Modelle spezialisiert ist. Simulationswerkzeuge wie ExtendSim (Damiron und Krahl 2014) und AnyLogic (Jain und Lechevalier 2016) hingegen ermöglichen die Erstellung von Simulationsmodellen mit verschiedenen Simulationsparadigmen in einem Modell, wie zum Beispiel die Kombination von discrete-event und discrete-rate Modellelementen in ExtendSim.

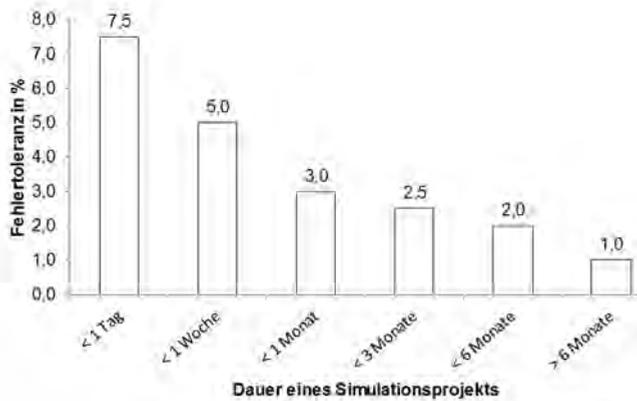


Abbildung 1: Fehlertoleranz der befragten Produktionsplaner hinsichtlich von Simulationsergebnissen (Schauf 2016)

ExtendSim und AnyLogic sind jedoch in der Automobilindustrie bei weitem nicht so verbreitet wie Plant Simulation, was unter anderem daran liegt, dass Plant Simulation mit seinen Bausteinen den Fokus auf Materialflussprozesse legt und das mit dem in Plant Simulation erstellten VDA Automotive Bausteinkasten (Mayer und Pöge 2010) spezielle Bausteine für Produktions- und Logistikprozesse in der Automobilindustrie existieren und genutzt werden können.

Der Beitrag untersucht an zwei Planungsaufgaben aus der Automobilindustrie, ob die Anwendung des mesoskopischen Simulationsansatzes den Anforderungen der Produktionsplaner nach kürzeren Simulationsstudien gerecht werden kann.

2 Mesoskopische Simulationsmodelle

Bei vielen Aufgabenstellungen in Produktion und Logistik (z. B. Dimensionierungen, Kapazitätsplanungen, Durchsatzberechnungen, Grobplanungen) ist eine aggregierte mesoskopische Sicht vorhanden, jedoch wird der Begriff mesoskopisch nicht ausdrücklich genutzt. Oft sind sowohl die Daten zu den Leistungsanforderungen (Systemlast) und den Ressourcen (System) sowie die gewünschten Leistungsergebnisse in einer aggregierten Form (Menge/Zeiteinheit) gegeben, die einer mesoskopischen Sicht entspricht (siehe Abb. 2).

Die Grundidee mesoskopischer Simulationsmodelle besteht deshalb in der Abbildung logistischer Flussprozesse auf einer aggregierten Ebene, um eine schnelle Modell-erstellung und -berechnung zu ermöglichen. Deshalb operieren mesoskopische Modelle mit Flussobjektmenge und nicht mit einzelnen Flussobjekten. Logistikprozesse können somit durch Flüsse mit stückweise konstanten Flussintensitäten (discrete-rate Simulation) abgebildet werden. Das ermöglicht eine Ereignisplanung für lineare kontinuierliche Flussprozesse und führt zu einer schnellen Modell-berechnung, da der Systemzustand nicht mehr kontinuierlich neu berechnet werden muss, sondern nur noch dann, wenn Änderungen der Flussintensitäten auftreten.

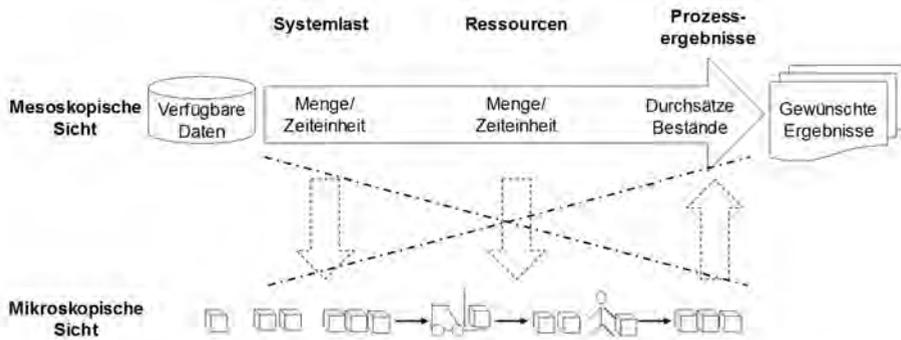


Abbildung 2: Mesoskopische und mikroskopische Sicht

Der Simulationszeitschritt ist somit variabel und die Schrittgröße hängt vom Auftreten geplanter Ereignisse ab. Das führt zu kurzen Rechenzeiten. Die Prinzipien der ereignisbasierten Berechnung von linearen kontinuierlichen Prozessen werden in der discrete-rate Simulation der Software ExtendSim (Krahl 2009; Dameron und Nastasi 2008) und im hybriden Simulationsansatz von Kouikoglou und Phillis (2001) angewendet.

Eine reine ereignisdiskrete Darstellung kontinuierlicher Systeme wie die discrete-rate Simulation ist jedoch aufgrund ihrer hohen Abstraktion und Aggregation nicht sehr gut für die direkte Anwendung in der Logistik geeignet. Der von Reggelin (2011) und Reggelin und Tolujew (2011) beschriebene mesoskopische Modellierungs- und Simulationsansatz erweitert deshalb die reine ereignisbasierte Berechnung kontinuierlicher Systeme um ein

- Produktmodell mit Produkttypen (für die Abbildung verschiedener logistischer Flussobjekte) und Produktportionen (für die Abbildung von Aufträgen, Losen oder zusammenhängenden Lieferungen) und
- ein Prozessmodell mit sowohl stückweise konstanten Flussraten als auch impulsförmigen Flüssen für die Abbildung von gebündelten Objektflüssen.

3 Einsatz von Simulationsmodellen in der Produktions- und Logistikplanung

Schauf (2016) hat 29 Produktionsplaner befragt, welche Aufgaben (angelehnt an VDI 3633 Blatt 1 2014) sie bereits jetzt mit Hilfe von Simulation lösen und für welche Aufgaben sie zukünftig Simulationsmodelle anwenden möchten. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse dieser Befragung und die Eignung mesoskopischer Simulationsmodelle für diese Aufgabenstellungen aus Sicht der Autoren. Mesoskopische Simulationsmodelle scheinen für die meisten Planungsaufgaben, für die bereits Simulationsmodelle genutzt werden, geeignet zu sein.

Table 1: Einsatz von Simulation in der Produktions- und Logistikplanung (Schauf 2016)

	Simulation bereits genutzt	Geplanter Einsatz von Simulation	Mesoskopische Simulation geeignet
Auftragsreihenfolge	8 %	14 %	Nein
Durchsatz	15 %	11 %	Ja
Strategien	11 %	18 %	Ja
Funktions- und Leistungsnachweis	11 %	18 %	Teilweise
Dimensionierung	30 %	18 %	Teilweise
Leistungsgrenzen	2 %	4 %	Ja
Engpässe	5 %	4 %	Teilweise
Analyse von Alternativen	9 %	7 %	Teilweise

Die aktuelle und die geplante Nutzung von Simulation für Analyse- und Planungsaufgaben, die in Summe für die meisten Aufgaben zwischen 6 % und 48 % liegt (Tab. 1), steht im Widerspruch zu der Aussage, dass 97 % der Produktionsplaner eine Nutzung von Simulationsmodellen in der Planung als ‚unbedingt notwendig‘ (17 %), ‚sehr wichtig‘ (45 %), oder ‚wichtig‘ (35 %) erachten (Schauf 2016). Ein Grund dafür kann die bereits erwähnte Diskrepanz zwischen der von den Produktionsplanern geforderten schnellen Bereitstellung von Simulationsergebnissen und der oft langen Dauer von Simulationsprojekten sein.

4 Anwendung mesoskopischer Simulationsmodelle

Anhand von zwei Beispielen aus dem Bereich der Automobilindustrie wird nachfolgend gezeigt, wie die Anwendung von mesoskopischen discrete-rate Simulationsmodellen zur schnellen Bereitstellung von Simulationsergebnissen beitragen kann:

- Bewertung der Leistungsfähigkeit des Wareneingangs eines Montagewerkes.
- Ermittlung der Anzahl der benötigten Lastaufnahmemittel in einer Montagelinie.

Es werden Ergebnisgenauigkeit und Simulationsaufwand im Vergleich zu ereignisdiskreten Simulationsmodellen mit Plant Simulation verglichen, die typischerweise für diese Aufgabenstellungen angewendet werden. Für die Umsetzung der mesoskopischen Modelle wurde die Simulationssoftware ExtendSim genutzt, da ExtendSim die Möglichkeit bietet die discrete-rate Simulation (Rate Library) mit der ereignisdiskreten flussobjektbasierten Simulation (Item Library) in einem Modell zu kombinieren.

4.1 Bewertung der Leistungsfähigkeit des Wareneingangs eines Montagewerkes

In diesem Beispiel wird untersucht, ob der Durchsatz des Warenvereinnahmungsprozesses eines Montagewerkes die erforderliche Leistung erbringt. Abbildung 3 illustriert den wesentlichen Prozessablauf. Zwischen 06:00 Uhr und 23:30 Uhr

erreichen im halbstündlichen Takt ein bis drei LKW den Wareneingang. Die LKW werden zu einer der drei Schleusen zugewiesen. Die Anzahl geladener Behälter pro LKW unterliegt einer stochastischen Schwankung, deren Parameter vom Produkttyp der geladenen Ware abhängen. Jeder LKW hat mindestens einen Behälter und maximal 90 Behälter geladen. Nach der Entladung und einer Qualitätsüberprüfung werden die Behälter von Gabelstaplern in sogenannten Sortiergassen konsolidiert. Der abschließende Einlagerungsprozess wird erst initiiert, sobald alle Behälter einer LKW-Ladung auf die Sortiergassen verteilt wurden.

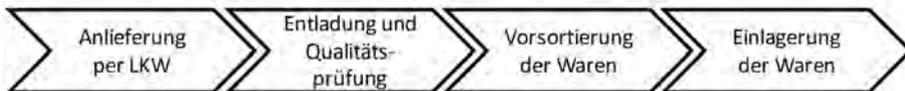


Abbildung 3: Prozesse am Wareneingang des Montagewerkes

Eine Herausforderung bei der mesoskopischen Modellierung ist die Wahl der geeigneten Aggregation. Es muss entschieden werden, welche Prozesse zu Flussraten aggregiert werden können und welche Prozesse weiterhin auf Objektebene abgebildet werden müssen. Abbildung 4 zeigt das konzeptionelle mesoskopische Modell in der Notation von ExtendSim. Es werden sowohl discrete-rate Modellierungselemente aus der Rate Library als auch discrete-event Modellierungselemente aus der Item Library genutzt.

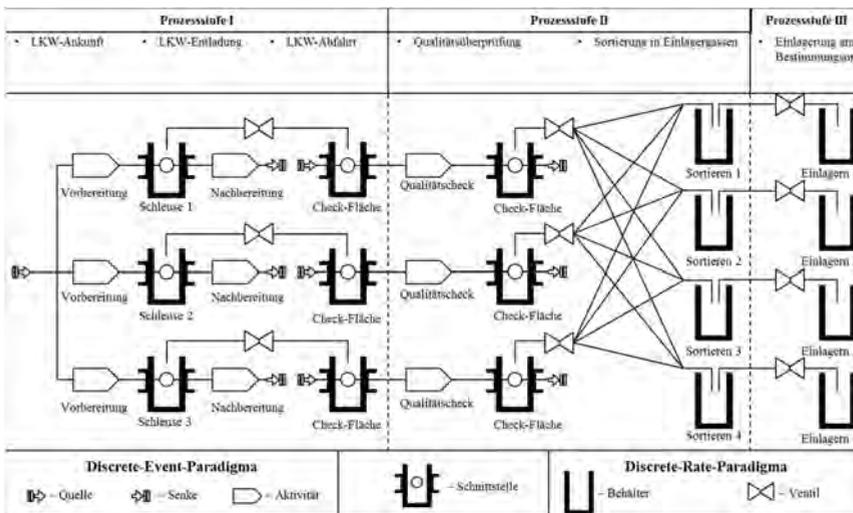


Abbildung 4: Konzeptionelles mesoskopisches Modell mit discrete-rate und discrete-event Prozessen in der Notation von ExtendSim

Die erstellten Flussobjekte in Prozessstufe I repräsentieren ankommende LKW im Wareneingangsbereich, deren Anzahl geladener Behälter über ein Attribut gespeichert ist. Nachdem ein LKW-Flussobjekt einen der drei parallelen Vorbereitungsprozesse durchlaufen hat, gelangt es in die zugehörige Schleuse, wo der Entladungsprozess

stattfindet. Im Schleusenelement wird das Attribut des LKW ausgelesen und in einen discrete-rate Bestand transformiert. Die Entladungsarbeitsspiele der Gabelstapler werden zu einer Flussrate aggregiert, welche die Prozesszeit aller notwendigen Arbeitsspiele für die Entladung eines LKW in Abhängigkeit

- der zum Zeitpunkt für den Prozess reservierten Anzahl an Gabelstaplern,
- der Fahrgeschwindigkeit, der Ladekapazität, der Aufnahme- und Abgabezeit und der Umstapelzeit pro Behälter von Gabelstaplern,
- der Distanz zwischen Schleuse und Pufferfläche und
- der im LKW geladenen Behälteranzahl

berücksichtigt.

Entladene LKW durchlaufen einen Nachbereitungsprozess, bevor sie das System verlassen und die jeweilige Schleuse für nachfolgende LKW freigeben. Die Qualitätsüberprüfung in Prozessstufe II erfolgt wieder objektbasiert, indem eine Entität erstellt wird, welche den discrete-rate Bestand der Pufferfläche als Attribut speichert. Der Prozess wird auf diese Weise realitätsnah abgebildet, da im Originalsystem die Behälter einer LKW-Ladung erst für die Vorsortierung freigegeben werden, wenn alle Behälter die Qualitätsüberprüfung durchlaufen haben. Des Weiteren ist eine aggregierte objektbasierte Modellierung hier sinnvoll, da so die Qualitätsüberprüfung aller Behälter in einem Berechnungsschritt durchgeführt werden kann.

Die Berechnungszeit für einen Simulationslauf mit dem mesoskopischen Modell ist wesentlich geringer als im ereignisdiskreten Modell (Tab. 2). Hinsichtlich der Warteschlangenlängen vor den Schleusen sowie des täglichen Systemdurchsatzes von Behältern sind nur sehr geringe Ergebnisabweichungen zwischen dem mesoskopischen und dem mikroskopischen Modell festzustellen.

Table 2: Vergleich der Simulationsergebnisse des mikroskopischen und des mesoskopischen Modells

	Durchsatz (Behälter/Tag)	Max. Anzahl LKW am Wareneingang	Dauer für einen Simulationslauf (Sekunden)
Mikroskopisches discrete-event Modell mit VDA Baustein-kasten in Plant Simulation	3.445	3	201
Mesoskopisches hybrides discrete-rate und discrete-event Model mit ExtendSim	3.464	3	27

4.2 Ermittlung der Anzahl der benötigten Lastaufnahmemittel in einer Montagelinie

Eine typische Aufgabe für Produktions- und Logistikplaner ist die Dimensionierung der notwendigen Ressourcen für einen Prozess. Ca. 30 % der Planer nutzen für diese Aufgabe Simulationsmodelle (Tab. 1). In folgendem Beispiel hat der Planer die Aufgabe die benötigte Anzahl von Lastaufnahmemitteln für fünf Abschnitte einer

Montagelinie zu bestimmen. Abbildung 5 zeigt das dafür erstellte mesoskopische discrete-rate basierte Simulationsmodell in ExtendSim. Das Modell besteht im Wesentlichen aus den Blöcken der Rate Library und den Blöcken der Value Library. Das mesoskopische Modell wurde mit einem Plant Simulation Modell mit dem VDA Bausteinkasten für die gleiche Aufgabenstellung verglichen (Tab. 3).

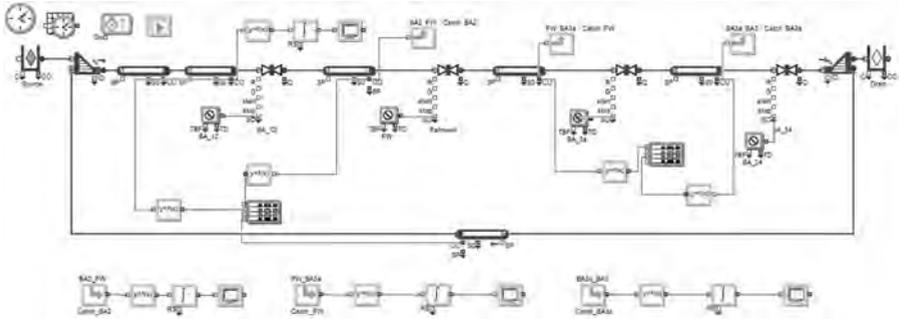


Abbildung 5: Mesoskopisches discrete-rate Simulationsmodell mit ExtendSim zur Ermittlung der benötigten Lastaufnahmemittel für eine Montagelinie

Tabelle 3: Vergleich der Simulationsergebnisse des mikroskopischen und des mesoskopischen Modells

	Anzahl benötigter Lastaufnahmemittel	Abweichung der Dauer für einen Simulationslauf (Minuten)
Mikroskopisches discrete-event Modell mit VDA Bausteinkasten in Plant Simulation	417	0 %
Mesoskopisches discrete-rate Modell mit ExtendSim	421	1 %

Die Ungenauigkeit des mesoskopischen discrete-rate Modells im Vergleich zum ereignisdiskreten Modell liegt bei ca. 1 %. Diese Abweichung liegt innerhalb der von den befragten Produktionsplanern akzeptierten Fehlertoleranz (Abb. 1). Die Nutzung der flussratenbasierten Simulation im mesoskopischen Modell führt zu einer sehr starken Reduzierung der Simulationsdauer (Tab. 3). Der Modellierungsaufwand für das mesoskopische discrete-rate Modell ist aufgrund der aggregierten flussratenbasierten Modellierung ebenfalls geringer als der für das ereignisdiskrete Modell. Das zeigt, dass mesoskopische, auf der discrete-rate Simulation basierende Modelle für den Produktions- und Logistikplaner eine mögliche Alternative zu ereignisdiskreten Modellen sind, um schnelle Simulationsergebnisse mit ausreichender Ergebnisqualität zu erhalten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung mesoskopischer discrete-rate Simulationsmodelle für zwei typische Planungsaufgaben aus der Automobilindustrie hat das Potenzial dieser Modellklasse gezeigt, den Anforderungen von Produktions- und Logistikplanern nach einer schnellen Bereitstellung der Simulationsergebnisse bei trotzdem ausreichender Genauigkeit der Ergebnisse gerecht zu werden.

Mesoskopische discrete-rate Modelle können für Analyse- und Planungsaufgaben Anwendung finden, in denen es nicht um die Verfolgung einzelner Flussobjekte geht, sondern in denen die Aggregation logistischer Flussobjekte zu Flussraten möglich ist. Denn nur so lässt sich die Berechnungszeit für die Simulationsmodelle reduzieren. Das schließt Aufgaben, wie beispielsweise die Untersuchung der Reihenfolgegüte in der Endmontage, aus. Für eine Reihe anderer Aufgaben, wie beispielsweise Durchsatzbetrachtungen, können mesoskopische discrete-rate Modelle jedoch eine zeitsparende Alternative zu discrete-event Modellen darstellen. Aufgabe für die Zukunft ist es, die Anwendung mesoskopischer discrete-rate Simulationsmodelle weiter voranzutreiben, um ihre Vor- und Nachteile und mögliche Einsatzfelder noch besser zu analysieren und zu beschreiben.

Literatur

- 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. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford (England), 2004.
- Damiron, C.; Krahl, D.: A Global Approach for Discrete Rate Simulation. In: Tolk, A.; Diallo, S.Y.; Ryzhov, I.O.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference (WSC), Savannah (USA), 2014, S. 2966-2977.
- Damiron, C.; Nastasi, A.: Discrete Rate Simulation Using Linear Programming. In: Mason, S.J.; Hill, R.R.; Moench, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J.W. (Hrsg.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC), Miami (USA), 2008, S. 740-749.
- Feldmann, K.; Reinhart, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer 2000.
- Hennies, T.; Reggelin, T.; Tolujew, J.; Piccut, P.-A.: Mesoscopic Supply Chain Simulation. Journal of computational science 5 (2014) 3, S. 463-470.
- 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. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), Austin (USA), 2009, S. 839-850.
- Huber, L.; Wenzel, S.: Trends und Handlungsbedarfe der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. Industrie Management 27 (2011) 5, S. 27-30.
- Jain, S.; Lechevalier, D.: Standards based Generation of a Virtual Factory Model. In: Roeder, T.M.K.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.): Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, D.C. (USA), 2016, S. 2762-2773.

- Kosturiak, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Wien: Springer 1995.
- Krahl, D.: ExtendSim Advanced Technology: Discrete Rate 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), 2009, S. 333-338.
- Kuhn, A.; Rabe, M.: Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 1998.
- Kouikoglou, V.S.; Phillis, Y.A.: Hybrid simulation models of production networks. New York: Kluwer Academic Plenum Publishers 2001.
- Law, A.M.; Kelton, W.D.: Simulation Modeling and Analysis, 4. Auflage. Boston: McGraw-Hill, Inc. 2007.
- 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.
- Pierreval, H.; Bruniaux, R.; Caux, C.: A Continuous Simulation Approach for Supply Chains in the Automotive Industry. In: Simulation Modelling Practice and Theory 15 (2007) 2, S. 185-198.
- 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 (WSC), Phoenix (USA), 2011, S. 1513-1523.
- Schauf, C.: Anforderungen von Produktionsplanern an die Simulation – Discrete-Rate Simulation als Ergänzung zur ereignisdiskreten Simulation in der Produktionsplanung? In: Schenk, M. (Hrsg.): 21. Magdeburger Logistiktage: Logistik neu denken und gestalten, Magdeburg (Deutschland), 2016, S. 141-148.
- Schenk, M.; Tolujew, J.; Reggelin, T.: Mesoscopic modeling and simulation of logistics networks. IFAC Proceedings Volumes 42 (2009) 4, S. 582-587.
- Scholz-Reiter, B.; Wirth, F.; Freitag, M.; Dashkovskiy, S.; Jagalski, J.; de Beer, C.; Rüffer, B.: Mathematical Models of Autonomous Logistic Processes. In: Hülsmann, M.; Windt, K. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics – The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Berlin: Springer 2007, S. 121-138.
- Scholz-Reiter, B.; de Beer, C.; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Tervo, J.T.: Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer 2008, S. 109-138.
- VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.

Nachnutzung von Wissen in Simulationsstudien

Reuse of Knowledge in Simulation Studies

Jana Stolipin, Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany),
jana.stolipin@uni-kassel.de, s.wenzel@uni-kassel.de

Abstract: The knowledge gained in finished projects is a valuable resource and can be used in future project tasks. The reuse of existing project results is impeded by a complicated search process of detailed information. Recovering project knowledge is based on the knowledge description. To assess the relevance of information for the reuse of simulation knowledge, an expert survey including a two stage Delphi Study was conducted. Based on the results of this Delphi Study, an overview of the information for the reuse of simulation knowledge in production and logistics can be issued.

1 Einleitung und Problemstellung

Die Wertschöpfung einer simulationsgestützten Planung entsteht durch die Verarbeitung von Informationen basierend auf den Fähigkeiten und Erfahrungen von Simulationsexperten sowie durch die Generierung und Kommunikation von Simulationsergebnissen. Somit kann die Ablaufsimulation als eine Facette der Digitalen Fabrik zur Wissensarbeit gezählt werden (Wenzel et al. 2011; North und Güldenbergs 2008, S. 21 f.). Neumann (2007) definiert die Simulation als einen Wissensentwicklungsprozess, einen Lernprozess sowie als Hilfsmittel zur Wissensvermittlung und Gegenstand der Wissensanwendung. Bei der Bearbeitung von Simulationsprojekten steht Wissen im Vordergrund der Tätigkeiten, da im Rahmen der simulationsgestützten Planung Expertenwissen eingesetzt wird, um neues Wissen zu generieren. Das Wissen aus abgeschlossenen Projekten stellt eine wertvolle Ressource dar und kann bei verschiedenen Projektaufgaben erneut eingesetzt werden. Nach dem Abschluss eines Projektes werden nicht nur die Projektaufgaben gelöst, sondern auch Wissen in explizierter und implizierter Form erzeugt und weitere Lerneffekte entstehen (Lindner 2010).

Aufgrund der Vielfalt von Wissenskontexten gibt es keine einheitliche Definition des Wissensbegriffs (Probst et al. 2012); jedoch weisen alle Definitionen ein gemeinsames Merkmal auf: Wissen betrifft die Gesamtheit der Fähigkeiten und Fertigkeiten, die eine Person zum Lösen von Aufgaben einsetzt. Nach Probst et al. (2012) basiert Wissen auf Zeichen, Daten und Informationen; diese Ebenen stehen in einem direkten

Zusammenhang und bilden eine Begriffshierarchie, die eine Erklärung zum Wissensbegriff liefert. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Ebenen wird als „Anreicherungsprozess“ (Probst et al. 2012) oder „Wissenstreppe“ (North 2011) verstanden. Im Rahmen einer Simulationsstudie wird das Wissen als „[...] die Gesamtheit des explizit und implizit vorhandenen oder im Verlauf des Simulationsprojektes entstehenden spezifischen oder verallgemeinerten Theorie- und Erfahrungswissens über das Simulationsproblem und seine Lösung (d. h. gegenstandsbezogenes Wissen) sowie über Ablauf und Organisation des Simulationsprojektes (d. h. vorgehensbezogenes Wissen) [...]“ verstanden (Neumann 2007, S. 188).

Die Nachnutzung von Simulationsartefakten und -wissen ist sehr wichtig für künftige Planungsaufgaben, da dadurch aufgrund von vorhandenen Erfahrungen eine Qualitätssteigerung der Simulationsergebnisse und eine schnellere Durchführung von Simulationsstudien erreicht werden können. In simulationsbasierten Projekten fehlen allerdings zumeist unterstützende Ansätze zur Nachnutzung von Simulationswissen. Die Anwendung der Methoden des Wissensmanagements wird in der Praxis oft unterschätzt und stößt aufgrund des hohen Aufwandes nur auf geringe Akzeptanz bei den Anwendern (Wenzel et al. 2013). Auch die Nachnutzung von Simulationsartefakten ist für weitere Planungsvorhaben in der Praxis gering (Jensen 2007; Wenzel et al. 2008; Eley 2012). Die Sicherung und Nachnutzung von projektbezogenem Simulationswissen setzen ein gezieltes Wissensmanagement voraus und sind ohne nachnutzungsorientierter Dokumentation nur schwer zu realisieren oder mit einem hohen Aufwand in Bezug auf Anpassungen und Einarbeitungsstunden in das Modell bzw. das Planungsprojekt verbunden. Außerdem wird die Nachnutzung von vorhandenen simulationsrelevanten Arbeitsergebnissen durch das Nichtfinden von relevanten Daten und Informationen in umfangreichen Modell- und Datenarchiven erschwert.

Die Nachnutzung und Wiederverwendbarkeit werden seit Jahren in vielen Bereichen wie Produktion, Planung, Entwicklung und Wissenschaft diskutiert. Willmann (2011) strukturiert das Planungswissen im Rahmen der Digitalen Fabrik und leitet eine Wissensstruktur in Bezug auf die Planungsaufgaben ab. Die VDI-Richtlinie 3633 (2014) weist auf die Notwendigkeit zur Wiederverwendung von Simulationsmodellen hin. Darüber hinaus wird der Einsatz von Modellmanagementsystemen für die Simulation diskutiert (Nance et al. 1981). Bley et al. (2000) schlagen ein Modellmanagementsystem (SimBase) für die Materialsimulation vor und weisen darauf hin, dass eine erfolgreiche Integration von solchen Systemen eine intensive und wissensorientierte Integration in das Unternehmen benötigt. Meyer et al. (2010) liefern am Beispiel einer Belieferungssimulation aus der Automobilindustrie Ansätze zur Verbesserung der Wiederverwendung von Simulationseingangsdaten unter Verwendung eines Expertensystems. Erfahrungen des Software Engineerings wurden in Weyrich und Steden (2013) aufgegriffen, die eine methodische Vorgehensweise für die Identifikation wiederverwendbarer Module bei bereits vorhandenen Simulationsmodellen von Automatisierungssystemen diskutieren. Weitere organisatorische und technische Vorgehensweisen bei der Nachnutzung von Simulationsmodellen werden in Wenzel et al. (2008) betrachtet. Laut Wenzel et al. (2013) liegt die Problematik der Nachnutzung von Simulationswissen in der Präzision der Beschreibung von Modellzwecken und deren Gültigkeiten.

Die nachhaltige Nachnutzung, die schnelle Orientierung in Planungsdaten und das Wiederfinden von Simulationswissen benötigen eine geeignete Strukturierung des Simulationswissens, die einerseits unternehmensspezifisch und andererseits kontext-

bezogen sein muss. Das Wiederfinden des projektspezifischen Wissens muss auf der Verwendung von Informationen, die dieses Wissen beschreiben, basieren. Die beschreibenden Informationen spielen eine entscheidende Rolle beim Wiederfinden und bei der Nachnutzung des Wissens.

Im Rahmen dieses Beitrags sollen die Ergebnisse einer zweistufigen Delphi-Studie vorgestellt werden, die durchgeführt wurde, um die Relevanz von Informationen bei der Nachnutzung von Wissen im Umfeld der Ablaufsimulation einzuschätzen, die relevanten projektspezifischen Informationen zu identifizieren sowie den Begriff Simulationswissen zu konkretisieren.

Im Folgenden werden zunächst die Delphi-Studie hinsichtlich Aufbau und organisatorische Abwicklung, der Online-Fragebogen sowie die Ergebnisse der Delphi-Studie erläutert. Abschließend wird in einem Ausblick auf die weitere Nutzung der Ergebnisse für zukünftige Forschungstätigkeiten eingegangen.

2 Delphi-Studie zur Identifikation und Kategorisierung von Informationen zur Unterstützung der Nachnutzung von Simulationswissen

Die Delphi-Methode wird nach Häder (2015, S. 361) „[...] als stark strukturierter Gruppenkommunikationsprozess charakterisier[t] [...], in dessen Verlauf Sachverhalte, über die naturgemäß unsicheres und unvollständiges Wissen existiert, von Experten beurteilt werden.“ In vielen Publikationen wird die Delphi-Methode als „ein Instrument zur verbesserten Erfassung von Gruppenmeinungen“ und zur Konsensbildung unter den Teilnehmern der Befragung verstanden (siehe dazu Häder 2014, S. 19 ff.). Die Anwendungsgebiete von Delphi-Studien sind weitreichend; sie können zur Prognose von zukünftigen Entwicklungen auf unterschiedlichen Gebieten der Wissenschaft und Technologie, aber auch zur Erforschung von verschiedenen Sachverhalten eingesetzt werden. Nachfolgend werden neben der Gestaltung der durchgeführten Studie auch die Ziele der Studie sowie der Aufbau des Fragebogens und die für die Delphi-Studie ausgewählte Zielgruppe beschrieben.

2.1 Ziele der Delphi-Studie

Die Grundlage für die Nachnutzung von Simulationswissen in einem simulationsgestützten Projekt stellt die Identifikation von relevanten Informationen dar. Ziele der hierzu durchgeführten Studie sind einerseits die relevanten Informationen für die Nachnutzung von Wissen in Simulationsstudien zu ermitteln und andererseits das nachnutzungswürdige Wissen zu kategorisieren. Eine Wissenskategorie dient zur thematischen Zuordnung der Wissensinhalte einer Simulationsstudie und wird durch beschreibende Informationen charakterisiert. Die Kategorisierung der relevanten Informationen ist wichtig, um eine Zusammenfassung von Informationen und eine Übersicht von Wissen in den Phasen einer Simulationsstudie (bezüglich der Phasen des Vorgehensmodells für die Durchführung von Simulationsstudien vgl. Rabe et al. 2008) zu erhalten. Zudem wird mit der Delphi-Studie das Ziel verfolgt, die Wichtigkeit von relevanten Informationen bei der Nachnutzung von Simulationswissen durch Experten zu bewerten. Aufbauend auf den Ergebnissen der Delphi-Studie soll eine Liste von Informationen in Bezug auf ihre Relevanz bei der Nachnutzung erarbeitet werden.

2.2 Aufbau und Durchführung der Studie

Eine Delphi-Befragung gilt als eine etablierte Methode zur Lösung von komplexen Problemen mit der Grundidee, in mehreren Stufen Expertenmeinungen anonym zu erfragen und diese zu analysieren. Somit werden subjektive Faktoren und die gegenseitige Beeinflussung der Experten, die bei einer Gruppendiskussion entstehen können, vermieden (Häder 2015). Durch die wiederholten Befragungen wird die Spannweite zwischen Expertenmeinungen minimiert und die Aussagekraft der Endergebnisse verstärkt. Die klassische Vorgehensweise bei der Delphi-Methode nach Häder (2014) beinhaltet folgende vier Schritte:

1. Schritt „Vorbereitung der Studie und Entwicklung eines Fragebogens über den relevanten Sachverhalt“: Die Problemstellung der Studie wird operationalisiert, messbare Kriterien zur Bewertung der Fragen werden abgeleitet. Die Vorbereitung des Fragebogens erfordert eine systematische Vorgehensweise und kann sowohl vom Forscherteam, das die Delphi-Studie durchführt, als auch mittels einer offenen Befragung von Experten durchgeführt werden.

2. Schritt „Auswahl einer Expertengruppe“: Bei Delphi-Studien mit spezifischen Problemstellungen muss beachtet werden, dass im Gegensatz zu anderen Methoden keine Abschätzung der Mindestanzahl von Teilnehmern vorgegeben wird, da bei vielen spezifischen Problemstellungen nur wenige geeignete Fachleute gefunden werden können. Anschließend wird der Fragebogen anonym an die ausgewählte Expertengruppe verschickt, um die Meinungen zu den interessierenden Sachverhalten zu erfragen.

3. Schritt „Auswertung des Fragebogens“: Die Ergebnisse der ersten Umfrage werden analysiert und in anonymer Form an die Experten weitergeleitet. Die Experten können ihre eigenen Meinungen zu den Sachverhalten überdenken.

4. Schritt „Wiederholung der Befragung“: Die Befragung wird auf der Grundlage der neu gewonnenen Erkenntnisse bis zum Erreichen eines vorher definierten Abbruchkriteriums wiederholt. Die Wiederholung der Umfrage führt zur Komprimierung des Meinungsbildes in der Expertengruppe und damit zu einem eindeutigeren Ergebnis.

Aufgrund der Eignung der Delphi-Methode für die oben beschriebene Fragestellung führt das Fachgebiet für Produktionsorganisation und Fabrikplanung der Universität Kassel eine Delphi-Studie zum Thema „Identifikation und Kategorisierung von Informationen zur Unterstützung der Nachnutzung von Wissen in Simulationsstudien“ mittels eines internetbasierten Fragebogens im Zeitraum vom 15. März 2017 bis 02. Mai 2017 durch. Die Gestaltung der Studie basiert auf dem Vorgehen der klassischen Delphi-Methode, wobei zwei Fragerunden umgesetzt werden.

Im ersten Schritt der Studie werden die für die Nachnutzung von Simulationswissen relevanten Informationen gesammelt, kategorisiert und die Art der Bewertung durch die Experten festgelegt. Um den Umfang der Delphi-Studie überschaubar zu halten, erfolgt vor der Durchführung der ersten Umfrage eine Voruntersuchung zur Ermittlung von relevanten Informationen im Rahmen einer Simulationsstudie. Das Ergebnis der Voruntersuchung ist eine vorläufige Liste mit insgesamt 107 relevanten Informationen. Diese erste Liste berücksichtigt nicht nur die einzelnen Informationen, sondern auch weitere sogenannte Informationstypen nach Abel (2013, S. 62), die zur Zusammenfassung von einzelnen Informationen in einer Simulationsstudie dienen und

mögliche Varianten und Zielsetzungen dieser Informationen abdecken. Diese Informationstypen können als erste Zusammenfassung von bestimmten Informationen verstanden (die Begriffe Informationen und Informationstypen werden in diesem Beitrag synonym verwendet) und in Wissenskategorien einsortiert werden, die sich an dem Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien nach Rabe et al. (2008) anlehnen. Die sieben Wissenskategorien mit der Anzahl der dazugehörigen Informationen (als Basis der ersten Fragerunde) sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Sieben Wissenskategorien (WK) zur Simulation

WK-Nr.	Name der Wissenskategorie (WK)	Informationsanzahl
1	Allgemeines Wissen über die Simulationsstudie	9
2	Managementwissen im Simulationsprojekt	8
3	Wissen über die Spezifikation der Simulationsaufgabe und die Zielsetzung	13
4	Wissen über das Realsystem	14
5	Wissen über die projektspezifischen Daten	14
6	Wissen über das Simulationsmodell und die Modellbildung	30
7	Wissen über die Simulationsergebnisse und Erfahrungen zum Simulationsmodell	19

Der Aufbau des Fragebogens sowie die Operationalisierung der Problemstellung der Studie werden im Abschnitt 2.3 beschrieben. Die Delphi-Studie beinhaltet allerdings nicht nur eine Bewertung der Informationen in den sieben Wissenskategorien, sondern erlaubt auch die Bildung neuer Wissenskategorien.

Im zweiten Schritt werden die potenziellen Experten für die Delphi-Studie ausgewählt. Die Umfrage der Delphi-Studie wendet sich an Personen mit langjähriger Simulationserfahrung im Rahmen der Produktions- und Logistikplanung. Aufgrund dieser Anforderungen werden Mitglieder der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), Mitglieder der VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL) sowie Experten aus der Industrie angefragt. Somit wird sichergestellt, dass die Teilnehmer der Studie über das notwendige theoretische und praktische Wissen zu Simulationsstudien verfügen. Die Einladungen zur Teilnahme an der Online-Umfrage werden per E-Mail an die Experten verschickt. Insgesamt erklären sich 17 Experten bereit, an der Delphi-Studie teilzunehmen. Die Umfrage wird unter Verwendung des in Abschnitt 2.3 erläuterten Fragebogens digital und anonym durchgeführt. Die internetbasierten Fragebögen der ersten Fragerunde werden per E-Mail an die 17 Experten am 15.03.2017 versandt und für 18 Tage online geschaltet. Die digitalen Fragebögen enthalten neben den Fragen auch eine Anweisung und Beschreibung zur Durchführung der Delphi-Studie.

Im dritten Schritt werden die Ergebnisse der ersten Runde der Delphi-Studie ausgewertet, für die zweite Fragerunde vorbereitet und in die zweite Befragung integriert.

Der erweiterte Online-Fragebogen der zweiten Befragung wird im vierten Schritt der Delphi-Studie am 10.04.2017 erneut den Fachleuten zugesandt, damit die Experten ihre Meinungen überdenken und ggf. ändern können. Diese zweite Umfrage endet am 02.05.2017. Danach ist ein endgültiges Ergebnis der Delphi-Studie mit einer aggregierten Gruppenmeinung zum Thema Nachnutzung von Simulationswissen mittels Informationen verfügbar.

2.3 Aufbau der Fragebogen

Der Aufbau des Fragebogens zur ersten Runde der Delphi-Studie besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil umfasst die Bewertung der sieben in Tabelle 1 dargestellten Wissenskategorien mit den dazugehörigen Informationen. Zur Bewertung der Informationen wird eine verbalisierte Skala mit einer geraden Anzahl an Antwortmöglichkeiten eingesetzt. Somit wird bewusst auf eine neutrale Mitte als Antwortmöglichkeit verzichtet, um eine eindeutige Tendenz bei der Beantwortung zu erzwingen. Für den ersten Teil des Fragebogens kann eine Bewertung von 0 (überhaupt nicht relevant für die Nachnutzung von Wissen) bis 3 (besonders relevant für die Nachnutzung von Wissen) oder ein „weiß nicht“-Bewertungskriterium erfolgen. Alle identifizierten 107 Informationen in den sieben Wissenskategorien können anhand dieser Bewertungskriterien bewertet werden; zudem können weitere Informationen ergänzt werden. Außerdem besteht in einem zweiten Teil der ersten Befragung die Möglichkeit, eigene Kategorien und dazugehörigen Informationen vorzuschlagen. Hier wird auf die Antwortbewertung verzichtet.

Der Fragebogen für die zweite Runde der Delphi-Studie besitzt den gleichen Aufbau sowie das gleiche Bewertungsschema wie der erste Fragebogen und basiert auf den Ergebnissen aus der ersten Runde der Befragung. Diese Ergebnisse werden in Form von prozentualen Angaben, die die Antworten der Experten aus der ersten Umfrage im Verhältnis darstellen, aufbereitet, sodass ein Überblick der Antworten aller Experten zu den einzelnen Fragen entsteht (siehe Abb. 1). Bei den Ergänzungen der Experten bezüglich weiterer Wissenskategorien und dazugehörigen Informationen werden vorgeschlagene Informationen und Wissenskategorien (mit dem Vermerk „Expertenmeinung“) in den Fragebogen integriert.

Wichtig für die Nachnutzung von Wissen aus der Kategorie "Allgemeines Wissen über die Simulationsstudie" sind Informationen ...					
	3 - besonders relevant	2 - eher relevant	1 - eher nicht relevant	0 - überhaupt nicht relevant	weiß nicht
... zum Titel der Simulationsstudie [Ergebnisse der ersten Umfrage: besonders relevant: 35,71 % eher relevant: 28,57 % eher nicht relevant: 28,57 % überhaupt nicht relevant: 7,14 % weiß nicht: 0,00 %]	○	○	○	○	○
... zum Aufragnehmer (Name, Adresse, Branche) [Ergebnisse der ersten Umfrage: besonders relevant: 14,29 % eher relevant: 42,86 % eher nicht relevant: 28,57 % überhaupt nicht relevant: 14,29 % weiß nicht: 0,00 %]	○	○	○	○	○

Abbildung 1: Ausschnitt des Fragebogens aus der zweiten Runde der Delphi-Studie

In Abbildung 1 ist ein Ausschnitt des Online-Fragebogens der zweiten Fragerunde dargestellt. Dieser Ausschnitt zeigt ein Beispiel für die Bewertung von zwei Informationen aus der ersten Wissenskategorie „Allgemeines Wissen über die Simulationsstudie“. Die Ergebnisse der ersten Fragerunde sind in eckigen Klammern abgebildet und dienen der Qualitätssteigerung der zweiten Umfrage. Der gesamte Fragebogen ist entsprechend dieses Ausschnittes umgesetzt. Außerdem besteht in der zweiten Fragerunde die Möglichkeit zum Kommentieren der Antworten.

3 Ergebnisse der Delphi-Studie

Die nachfolgenden Ausführungen fassen die Ergebnisse der Delphi-Studie im Überblick zusammen. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich insbesondere auf die

Auswertung der zweiten Fragerunde. Von den 17 an der Studie teilgenommenen Experten werden in der ersten Runde der Befragung 14 vollständig beantwortete Fragebögen zurückgesandt (Rücklaufquote: 82,35 %). In der zweiten Runde wird die Online-Befragung wieder an die gleichen 17 Experten verschickt; mit 12 vollständig beantworteten Fragebögen liegt die Rücklaufquote bei 70,59 %. Der Rückgang der Antwortquote in der zweiten Fragerunde lässt sich auf terminliche Probleme der Teilnehmer zurückführen.

Zu Beginn der Delphi-Studie werden den Experten 107 Informationen in sieben Wissenskategorien vorgestellt. Basierend darauf können bis zum Ende der Studie 134 Informationen (die ergänzten Informationen sind mit einem [E] in der Tabelle 2 gekennzeichnet) in den sieben vorgeschlagenen Wissenskategorien sowie sechs weitere Wissenskategorien (mit jeweils zwei bis drei Informationen) zusätzlich identifiziert werden. Der Mittelwert der Relevanz einzelner Informationen (über alle Wissenskategorien) reicht von 0,58 bis 3,0. Somit wird keine der identifizierten Informationen als vollständig unwichtig für die Nachnutzung von Simulationswissen angesehen. Tabelle 2 zeigt ausschnittsweise die Informationen aus einzelnen Wissenskategorien, wobei die grau hinterlegten Nummern den Wissenskategorien aus Tabelle 1 entsprechen. Die hier dargestellte Reihenfolge der Informationen aus einzelnen Wissenskategorien ist aufsteigend sortiert und zeigt somit ausschnittsweise die Relevanz der einzelnen Informationen in der jeweiligen Gruppe (Ergebnisse der zweiten Fragerunde). Tabelle 2 verdeutlicht, dass die Streuung bei den Ergebnissen (2. Fragerunde) gering ist; die maximale Standardabweichung liegt bei $\pm 1,08$, die minimale Standardabweichung bei $\pm 0,0$. Insbesondere tritt dieser Fall bei den Informationen (siehe Tabelle 2 Informationen ohne [E]-Kennzeichnung) auf, die in der ersten Runde schon einmal abgefragt wurden. Dies verdeutlicht das Prinzip der Delphi-Studie für die Konsensbildung. Im Gegensatz zum Mittelwert zeigt der Median, dass eine stärkere Orientierung auf die relevanten Informationen in Bezug auf die Nachnutzung des Wissens mit Bewertungen von mindestens 2,0 (bei ca. 76 % aller Informationen) vorhanden ist, diese 102 Informationen sind besonders relevant für die Nachnutzung des Simulationswissens. Bei den drei Informationen: „Informationen zum Realsystem des Projektes“ (1. Wissenskategorie), „Informationen zu Aufgabenstellungen, dazugehörige Hintergründe und Rahmenbedingungen“ (3. Wissenskategorie), „Informationen zu besonders relevanten Eigenschaften des betrachteten Systems“ (4. Wissenskategorie), die das simulierte Realsystem betreffen, sind sich alle Experten einig (Mittelwert: 3,0; Median: 3,0 und Standardabweichung $\pm 0,0$), dass diese für die Nachnutzung des Simulationswissens besonders wichtig sind.

Ergänzend werden die sechs Wissenskategorien: „Wissen über die Kategorisierung des Modellgegenstandes nach SCOR“, „Wissen über den Life-Cycle der Simulation“, „Wissen über Kommunikationsvereinbarungen im Projektteam und zum Kunden“, „Wissen über die Dokumente“, „Wissen über ein zukünftiges System“, „Wissen über die Bewertung alternativer Lösungen, Modellvarianten, Experimente und Szenarien“ von Experten in der ersten Fragerunde mit jeweils zwei bis drei Informationen vorgeschlagen und bei der zweiten Runde bewertet. Da bei diesen ergänzend vorgeschlagenen Wissenskategorien keine Einigkeit zwischen den Experten hinsichtlich ihrer Gültigkeit als weitere Wissenskategorien und der Relevanz ihrer Informationen besteht, müssen diese bei zukünftigen Forschungen genauer untersucht oder ihre beschreibenden Informationen in bereits bestehende Wissenskategorien integriert werden.

Tabelle 2: Ergebnisse der Delphi-Studie (nach der zweiten Fragerunde): Mittelwert (MW), Median (MD) und Standardabweichung (Stdabw.) der bewerteten Informationen (Informationen mit [E]-Kennzeichnung zeigen die Ergänzungen der Experten in der ersten Runde) aus den sieben Wissenskategorien (siehe Tabelle 1)

Informationen...	MW	MD	Stdabw.
... zum Realsystem des Projektes	3,00	3,00	0,00
... zum Inhalt / Scope [E]	2,67	3,00	0,49
... zum Titel der Simulationsstudie	2,33	3,00	0,89
⋮	⋮	⋮	⋮
... zum Auftragnehmer	1,58	2,00	0,51
... zum Auftragnehmer/Auftraggeber-Verhältnis: Planungsdienstleistung, Angebotsunterstützung, Umsetzungsabsicherung [E]	1,50	1,50	0,80
... über bereits vorhandene Simulationserfahrungen der beteiligten Fachabteilungen und Personen	1,33	1,00	0,49
... zu im Rahmen des Projekts entstandenen Entscheidungsempfehlungen [E]	2,50	2,50	0,52
... zu besonderen Herausforderungen [E]	2,25	2,00	0,75
... zum tatsächlich verwendeten Personaleinsatz in Personen/Monate	1,75	2,00	0,75
⋮	⋮	⋮	⋮
... zur personellen Organisation der Simulationsstudie	1,25	1,00	0,45
... zum geplanten Personalaufwand in Personen/Monate	1,25	1,50	0,87
... zu einzelnen Aufgaben im Simulationsprojekt	1,25	1,00	0,62
... zu Aufgabenstellungen, dazugehörigen Hintergründen und Rahmenbedingungen	3,00	3,00	0,00
... zu Kriterien und Zielvorgaben für einzelne Kenngrößen im Modell	2,58	3,00	0,51
... zur Benennung und Funktionsweise des betrachteten Systems	2,58	3,00	0,67
⋮	⋮	⋮	⋮
... zur Widerspruchsfreiheit von Anforderungen [E]	1,64	1,00	0,81
... zur Form der Erfassung von Anforderungen [E]	1,18	1,00	0,75
... zur verfügbaren Software und zu Lizenzen, die im Verlauf der Simulationsstudie zum Erreichen der Ziele relevant sind	0,92	1,00	0,29
... zu besonders relevanten Eigenschaften des betrachteten Systems	3,00	3,00	0,00
... zu Systemgrenzen des betrachteten Systems	2,92	3,00	0,29
... zu Steuerungen des betrachteten Systems	2,92	3,00	0,29
⋮	⋮	⋮	⋮
... zu Ereignissen und Aktivitäten im betrachteten System	2,00	2,00	0,60
... zu Eigenschaften der Objekte im betrachteten System	1,92	2,00	0,67
... zu Quellen für Validierungsdaten [E]	1,42	1,50	0,67
... zu fehlenden Daten und Informationen über die Datenapproximation oder -generierung	2,75	3,00	0,45
... zu tatsächlich zur Verfügung gestellten Daten	2,58	3,00	0,67
... über die tatsächlich verwendeten Eingangsdaten	2,58	3,00	0,51
⋮	⋮	⋮	⋮
... zu Methoden der Datenauswertung	1,75	2,00	0,75
... zu Daten, die zur automatischen Modellgenerierung genommen wurden [E]	1,75	2,00	1,06
... zur Art der Datenbeschaffung	1,42	1,00	0,51
... zum übergeordneten Prozess im Modell	2,92	3,00	0,29
... zu Grenzen und Schnittstellen im Modell	2,83	3,00	0,39
... zum Ziel der Nachnutzung [E]	2,25	2,00	0,62
⋮	⋮	⋮	⋮
... zum typischen Rechnerzeitbedarf eines Simulationslaufs	1,17	1,00	0,83
... zum Namen des Modells und des Modellerstellers	1,08	1,00	0,90
... zum Speicherplatzbedarf für das Simulationsmodell	0,58	0,00	0,79
... zu Ergebnissen der Simulationsstudie	2,92	3,00	0,29
... zu Erkenntnissen, die durch eine Simulationsstudie gewonnen wurden [E]	2,58	3,00	0,51
... zu abgeleiteten Maßnahmen für das reale System	2,67	3,00	0,49
⋮	⋮	⋮	⋮
... über die Möglichkeiten zur Vermeidung von Fehlern	1,42	1,00	0,79
... zu möglichen weiteren Experimenten	1,33	1,00	0,65
... zu Rechenzeiten der Simulationsläufe	0,67	0,50	0,78

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Nachnutzung von Simulationwissen nicht alle bisher erarbeiteten Informationen gleich relevant sind. Mit Hilfe der Expertenbefragung können jedoch die für die Nachnutzung von Simulationwissen wichtigen Informationen klar identifiziert werden. Zudem kann die Liste von wissensbeschreibenden Informationen aufgrund der Erfahrungen der Experten erweitert werden. Die Relevanz dieser Erweiterung bleibt zu prüfen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nachnutzung von projektspezifischem Wissen basiert auf der Verwendung von Informationen, die dieses Wissen beschreiben; allerdings fehlt in der Literatur eine Liste mit nachnutzungsrelevanten Informationen für Simulationsstudien. Unter anderem fehlt auch eine Einschätzung dieser Informationen in Bezug auf ihre Bedeutung für die Nachnutzung des Wissens. Aus diesen Gründen ist eine zweistufige Delphi-Studie durchgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Studie liefern für Simulationsstudien eine Liste mit insgesamt 134 grundlegenden Informationen zur Beschreibung von sieben Wissenskategorien. Davon können aufgrund der Bewertung 102 Informationen identifiziert werden, die bei der Nachnutzung des Wissens im Rahmen einer Simulationsstudie besonders relevant sind. Zukünftig werden auf der Grundlage dieser Ergebnisse weitere Forschungstätigkeiten zum Thema Nachnutzung und Beschreibung von Simulationwissen durchgeführt. Ein wichtiges Forschungsziel ist in diesem Zusammenhang der Entwurf eines nachnutzungsorientierten Dokumentationsprozesses für Simulationsstudien.

Literatur

- Abel, D.: Bewertungsmethodik zur Einflussanalyse der Informationsqualität auf die Simulationsergebnisse. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Produktionsorganisation und Fabrikplanung. Band 4, Aachen: Shaker 2013.
- Bley, H.; Oltermann, R.; Wuttke, C.C.: Distributed model management system for material flow simulation. *Journal of Materials Processing Technology* (2000) 107, S. 478- 484.
- Eley, M.: Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Häder, M.: Empirische Sozialforschung. Eine Einführung. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer 2015.
- Häder, M.: Delphi-Befragungen. Ein Arbeitsbuch. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer 2014.
- Jensen, S.: Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job-shop-Fertigung. Kassel: kassel univ. press, 2007.
- Lindner, F.: Projektwissensmanagement. Status quo, Gestaltungsfaktoren und Erfolgsdeterminanten des Wissensmanagements in der Projektentwicklung. Münster: LIT 2010.
- Meyer, T.; Müller-Sommer H.; Straßburger, S.: Erhöhung der Wiederverwendbarkeit von Eingangsdaten für Belieferungssimulationen durch Expertensysteme. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Tagungsband zur 14. ASIM-Fachtagung Simulation

- in Produktion und Logistik. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 421-428.
- Nance, R.E.; Mezaache, A.L.; Overstreet, C.M.: Simulation Model Management: Resolving the technological Gaps. In: Ören, T.I.; Delfosse, C.M.; Schub, C.M. (Hrsg.): Proceedings of the 1981 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York (USA), 1981, S. 173-179.
- Neumann, G.: Wissensmanagementkonzepte für die Validierung und Qualitätssicherung in der prozessorientierten Logistiksimulation. In: Engelhardt-Nowitzki, C.; Nowitzki, O.; Krenn, B. (Hrsg.): Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation. State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007, S. 183-202.
- North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2011.
- North, K.; Güldenbergh, S.: Produktive Wissensarbeit(er). Antworten auf die Management-Herausforderung des 21. Jahrhunderts. Mit vielen Fallbeispielen. Wiesbaden: Gabler 2008.
- Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer 2012.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- VDI 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.
- Wenzel, S.; Abel, D.; Gutfeld, T.; Schmitz, M.: Ansätze zur methodischen Unterstützung kollektiver Intelligenz bei der Abwicklung von Planungsprojekten in Produktion und Logistik. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Corporate capability management - wie wird kollektive Intelligenz im Unternehmen genutzt? Berlin: Gito (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V.) 2013, S. 407-430.
- Wenzel, S.; Abel, D.; Willmann, C.: Wissensarbeit in der Digitalen Fabrik – Der Zwiespalt zwischen Systematisierung und Kreativität. In: Spath, D. (Hrsg.): Wissensarbeit - zwischen strengen Prozessen und kreativem Spielraum. Berlin: Gito (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e. V.) 2011, S. 251-276.
- 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: Springer 2008.
- Weyrich, M.; Steden, F.: Methodische Identifikation wiederverwendbarer Module für die Simulation von Automatisierungssystemen. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. VDI-Berichte 2209. Automation 2013. 14. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik. Baden-Baden (Deutschland), 2013, S. 135-139.
- Willmann, C.: Konzeption einer kontextbasierten Wissensumgebung für die Digitale Fabrik. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Produktionsorganisation und Fabrikplanung. Band 1, Aachen: Shaker 2011.

Simulationsergebnis und das Ergebnis der Simulationsstudie in Form der resultierenden Handlungsempfehlung – Fallbeispiel einer Simulationsstudie bei der Rudolph Logistik Gruppe

Simulation Result and the Result of the Simulation Study in Form of the Resulting Recommendations – Case Study of a Simulation Study at the Rudolph Logistics Group

Philipp Fritzsche, Dennis Abel, Torsten Rudolph, Rudolph Logistik Gruppe,
Baunatal (Germany), philipp.fritzsche@rudolph-log.com,
dennis.abel@rudolph-log.com, torsten.rudolph@rudolph-log.com

Abstract: The following article deals with the distinction between “simulation results” and the “results of a simulation study in form of the resulting recommendations”. The definition of a “simulation result or results” focusses on the recommended actions derived from various simulation experiments. In contrast the “results of a simulation study” focusses on the actual implementation of these results. The example of the Rudolph Logistics Group, an international logistics service provider, exemplifies a practical approach that demonstrates the practical advantages of using this approach. For this purpose, the example “real life” of a warehouse in Hattorf shows how to use the knowledge of the simulation experts and the simulation model itself during the implementation phase in order to make sure to implement the results obtained.

1 Einleitung – Hintergrund und Problemstellung

Die zunehmende Komplexität logistischer Prozesse, bei denen neben dem Materialfluss selbst auch immer mehr der Informationsfluss zur Steuerung dieses Materialflusses im Vordergrund steht, bedingt einerseits eine detaillierte Planung neuer Systeme aber andererseits auch eine sorgfältige Analyse und Überplanung bestehender Systeme, um zukünftigen internen sowie externen Anforderungen gerecht zu werden.

Zur Identifikation von Verbesserungspotenzialen innerhalb der logistischen Prozesse – im Zusammenhang mit der Analyse und Überplanung bestehender Systeme - eignen sich diverse (Planungs-) Methoden als anwendbare Werkzeuge für die Praxis. Meist

beschränkt sich die Anwendung und Unterstützung dieser Methoden jedoch auf die Phasen der Planung und weniger auf eine Unterstützung des Anwenders während der tatsächlichen Umsetzung von Planungsergebnissen. Auch die ereignisdiskrete Simulation ist als ein solches Werkzeug bereits seit weit mehr als zehn Jahren etabliert (Law 2014) und legt ihren Fokus bei der Analyse bestehender Systeme ebenfalls auf die Identifikation von Veränderungs- bzw. Verbesserungspotenzialen im Rahmen der Planung. Das *Simulationsergebnis* kann dabei – analog der Ergebnisse anderer Planungsmethoden auch als Handlungsempfehlung für den Auftraggeber einer Simulationsstudie auf Basis der durchgeführten Simulationsexperimente verstanden werden (Abel 2013). Das tatsächliche *Ergebnis der Simulationsstudie* ist sowohl begrifflich als auch inhaltlich im Rahmen dieses Beitrags von dieser Handlungsempfehlung abzugrenzen und beschreibt die tatsächlich umgesetzte Veränderung auf Basis der gegebenen Handlungsempfehlung. Somit sind – bei einer phasenspezifischen Betrachtung – das Simulationsergebnis der entscheidende Output der Planungsphase und das Ergebnis der Simulationsstudie der Output der Umsetzungsphase im Anschluss an diese Planungsphase.

Die Praxis zeigt, dass die zu gebende Handlungsempfehlung zwar vom Auftraggeber einer Simulationsstudie durchaus als realistisch eingeschätzt und als Basis für notwendige Veränderungen erkannt wird, die tatsächliche Umsetzung der Veränderung aber immer wieder ein Hemmnis darstellt. Als Grund sei hierfür u. a. die mangelnde aktive Mitwirkung des Auftraggebers bei der Modellerstellung sowie der Ergebnisermittlung aufgrund des unterschiedlichen Wissenstands zum Durchführen von Simulationsstudien zwischen Simulationsexperte(n) und Auftraggeber genannt. Aber auch das „Zurückziehen“ des oder der Simulationsexperten nach der Übergabe der Handlungsempfehlung und somit das „Alleinlassen“ der operativen Entscheidungsträger bei einer Umsetzung kann als Hemmnis für die Realisierung möglicher Veränderungen in Betracht gezogen werden.

Die Herausforderung in der Praxis liegt nun darin, dass der prozessuale und hiermit einhergehende wirtschaftliche Erfolg bei einem Logistikdienstleister – in Abgrenzung zur reinen Beratungsleistung „Logistikplanung/Simulation“ – erst auf Basis der umgesetzten Veränderung zu erzielen ist. Dies bedeutet für das Durchführen von Simulationsstudien, dass bereits in der Projektplanung, neben den klassischen Phasen im Rahmen der Datenbeschaffung, Modellerstellung sowie Experimentdesign und -durchführung, ein Schwerpunkt auf die Umsetzung der Simulationsergebnisse gelegt werden muss. Im Rahmen dieses Beitrags soll somit nicht das Simulationsergebnis – als resultierende Handlungsempfehlung, sondern die Umsetzung der Handlungsempfehlung selbst – insbesondere auch unter Zuhilfenahme des Simulationsmodells und intensiver Einbindung operativer Entscheidungsträger – betrachtet werden. Aus Praxissicht ist es eben genau diese Umsetzung der Handlungsempfehlung, die im Vordergrund der Betrachtung steht, um Prozesse tatsächlich vorteilhaft umzustellen und sich somit aktiv auf geänderte Rahmenbedingungen einzustellen.

2 Grundlagen und Abgrenzung

Die in Abschnitt 1 aufgegriffene Zielsetzung, im Rahmen einer Simulationsstudie gezielt einen Schwerpunkt auf die Umsetzungsphase und die hiermit verbundenen

Aufgaben und Rollen der Simulationsexperten zu legen, ist neben der praxisgetriebenen Motivation auch wissenschaftstheoretisch zu begründen. In diesem Zusammenhang hat eine Analyse bestehender Arbeiten gezeigt, dass eben genau diese Umsetzung von Simulationsergebnissen im Rahmen einer Umsetzungsphase – als Bestandteil der gesamten Simulationsstudie – in wissenschaftlich methodischen Beiträgen nur selten gezielt Gegenstand der Betrachtung ist. Somit sind detaillierte Beschreibungen zur Vorgehensweise in einer Umsetzungsphase auch nur bedingt verfügbar.

Beispielhaft zu dieser Thematik können aus der Wissenschaft Modelle zum Vorgehen in Simulationsstudien, wie z. B. das in VDI 3633 Blatt 1 (2014) dargestellte Vorgehensmodell oder das Vorgehensmodell von Rabe et al. (2008) mit dem Schwerpunkt der Verifikation und Validierung der Daten und Modelle genannt werden. Beide Vorgehensmodelle schließen mit der Ergebnisumsetzung, beschreiben diese jedoch nicht gezielt methodisch als Bestandteil des Vorgehens von Simulationsstudien. Inhaltlich erfolgt insbesondere im Modell von Rabe et al. (2008) zwar die transparente Beschreibung einzelner Phasen sowie die zugehörige Dokumentationsnotwendigkeit dieser Phasen (-ergebnisse) als wichtiger Faktor für das Schaffen von Akzeptanz beim Auftraggeber, aber als Ergebnis wird die aus den Simulationsexperimenten resultierende Handlungsempfehlung betrachtet – also das Simulationsergebnis und weniger die Umsetzung dieses Ergebnisses – also das Ergebnis der Simulationsstudie.

Auch in Praxisberichten ist es meist die resultierende Handlungsempfehlung als Ergebnis des Simulationsprojekts, mit der ein Projekt als abgeschlossen betrachtet wird – auch wenn die Umsetzung unter Zuhilfenahme des Simulationsmodells stattgefunden hat, so ist der Fokus bestehender Arbeiten meist nicht auf diesen Aspekt gerichtet. Beispielhaft sei an dieser Stelle der Beitrag von Süß et al. (2009) genannt. Die Autoren gehen in ihrem Beitrag auf die Nutzung der 3D-Visualisierung in Simulationsstudien und die parallele Ausführung und Visualisierung mehrerer Simulationen ein. In diesem Zusammenhang wird auch der Vorteil der 3D-Visualisierung hinsichtlich der Akzeptanz der Simulationsergebnisse erwähnt, jedoch nicht tiefer diskutiert – auch weil es sich um einen methodisch-technischen Beitrag handelt (Süß et al. 2009).

Als weiteres Beispiel kann die von Wiese (2014) durchgeführte Fallstudie zur Analyse der Warenflusskette in einem Unternehmen der Fleischindustrie genannt werden. In diesem Zusammenhang wird die Simulation als Instrument der Entscheidungsfindung eingesetzt, um ggf. mögliche Fehlinvestitionen zu vermeiden. Wiese beschreibt hierbei ausführlich den Aufbau und Ablauf der Simulationsstudie sowie die kontinuierliche Einbindung des Auftraggebers, so dass eine Akzeptanz der Simulationsergebnisse erzielt werden konnte. Mit Hilfe der Simulation wird dem Entscheidungsträger die Auswahl der effizientesten Alternative erleichtert und es konnten tatsächlich Fehlinvestitionen – in den Bau eines neuen Fertigwarenlagers – vermieden werden. Die auf Basis der Simulationsexperimente zu gebende Handlungsempfehlung sieht eine Anpassung bestehender Prozesse zur Verbesserung der Material- und Informationsflüsse beim Auftraggeber vor. Inwiefern die Simulation bzw. das Simulationsmodell und die -ergebnisse auf Basis der durchgeführten Experimente bei der Umsetzung dieser Prozessanpassungen eine Relevanz aufzeigen und wie diese genau genutzt werden, wird jedoch nicht weiter beschrieben.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis – zumindest was die Inhalte von Veröffentlichungen angeht – ein Fokus auf die Simulationsergebnisse, also die zugegebene Handlungsempfehlung, gelegt wird. Inwiefern eine Umsetzung der Ergebnisse als Bestandteil der Simulationsstudie insbesondere in der Praxis bei einem international tätigen Logistikdienstleister erfolgen kann, wird daher Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen sein.

3 Die Rudolph Logistik Gruppe und die Methode der (ereignisdiskreten) Simulation

Die Rudolph Logistik Gruppe ist ein Logistikdienstleister mit 40 Standorten und über 5000 Mitarbeitern in Deutschland, Europa und auf der Arabischen Halbinsel. In den Geschäftsfeldern Automotive, Systemverkehre, Handel und Industrie werden umfassende Logistiklösungen entwickelt und realisiert. Dies können Teilprozesse wie Beschaffungs- oder Distributionslogistik sein, aber auch komplexe Outsourcing-Projekte mit der Übernahme kompletter Logistikketten.

Als Spezialist für alle logistischen Aufgaben in den Geschäftsfeldern Automotive, Industrie und Handel steuert die Rudolph Logistik Gruppe sowohl den Betrieb von Lieferanten-Logistik-Zentren als auch von Fertigwarenlager. Dabei werden Dienstleistungen erbracht wie

- Just in Time (JIT)- und Just in Sequence (JIS) Belieferung bis zum Verbrauchsort
- Warenkorb- und Set-Bildung
- Kommissionierung/Sequenzierung
- Intelligente Lagerplanung
- Werkslogistik, innerbetriebliche Transporte
- Intelligentes Datenmanagement (Big Data Management)
- POS-optimierte Konfektionierung

Value Added Services wie z. B. Vormontagen oder Fertigungsaufgaben vervollständigen das Leistungsspektrum.

In den klassischen Transportdienstleistungen der Systemverkehre erschafft die Rudolph Logistik Gruppe wirtschaftliche und effiziente Lösungen für eine europaweite Beschaffungs- und Distributionslogistik. Dies können u. a. sein:

- Teil- und Komplettladungsverkehre
- Milk-run-Konzepte
- Konsolidierung/De-Konsolidierung
- Ersatzteilversorgung

Die Aufzählung des Leistungsspektrums zeigt bereits, dass Kontraktlogistikdienstleistungen weit über das einfache Transportieren von A nach B oder das Einlagern einer Palette hinausgehen. Die Logistikdienstleistung umfasst heute vielmehr die Steuerung von komplexen und kleinteiligen Prozessen in anspruchsvollen Versorgungsketten (Rudolph und Abel 2014). Ferner ist die logistische Dienstleistung sehr stark durch den Einsatz der menschlichen Arbeitskraft und manuelle Tätigkeiten geprägt. In der Masse der Geschäfte verbleiben hochautomatisierte Lösungen doch eher die Ausnahmen - auch wenn dies medial anders wahrgenommen wird. Hochkomplexe Prozesssteuerung wird zwangsläufig in

der Praxis zu nicht minder anspruchsvoller Menschensteuerung. Menschen bewegen sich nun nicht wie Maschinen. Eine reine Beobachtung des „Ist-Zustands“ zur Beurteilung von Effizienz oder zur Ermittlung von Optimierungspotenzialen oder der ganz banalen Ableitung von Planungsstandardwerten kann somit nicht ausreichen. Auch die Umsetzung eines neuen Prozesses und die Ableitung des Erfolgs desselben über die Beobachtung funktionieren nur bedingt, da man niemals ausreichend Sicherheit herstellen kann, dass alle Prozessbeteiligten nun wirklich auch genau das tun, was geplant ist. Die Logistik benötigt folglich mehr und mehr objektive abstrakte Methoden, anhand derer bzw. anhand deren Ergebnissen sich genau solche Maßnahmen simulieren lassen, um danach auf der einen Seite den Ist-Zustand besser beurteilen und steuern zu können und auf der anderen Seite, um Verbesserungspotenziale gezielt zu erkennen und nachfolgend umzusetzen. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, wird unternehmensintern verstärkt als eine solche Methode die Simulation eingesetzt. Konkret findet in der Rudolph Logistik Gruppe die ereignisdiskrete Simulation in Form der Software „Tecnomatix Plant Simulation“ der Firma Siemens AG seit dem Jahr 2015 ihre Anwendung. Erste Projekte waren ausschließlich auf Planungsprojekte für externe Kunden ausgelegt. Das Potential der Simulation für die oben beschriebene Analyse bestehender Systeme wurde jedoch schnell erkannt und rückt in der Anwendung immer mehr in den Fokus. Mittlerweile wurden Simulationsprojekte gezielt umgesetzt und positive wie auch negative Erfahrungen gesammelt. Hierbei wurde auch der Bedarf, über die (auf Basis der Simulationsergebnisse) zu gebende Handlungsempfehlung hinauszugehen, erkannt. In aktuellen Simulationsprojekten wird somit gezielt eine Begleitung der Umsetzungsphase realisiert.

4 Darstellung des Fallbeispiels – Der Lagerstandort der Rudolph Logistik Gruppe in Hattorf

Die Rudolph Logistik Gruppe besitzt am Standort Hattorf (10 km südlich von Wolfsburg) eine Immobilie, die der Lagerung von etwa 13.000 Großladungsträgern (GLT) dient. Die Lagerung dieser Behälter erfolgt zum Großteil in Form von Blocklagerung. Ein kleiner Teil des Lagers sieht einen Regalbereich vor, in dem größtenteils sog. „langsam Produkte“ mit vergleichsweise geringen Materialabrufen gelagert werden (vgl. hierzu Abb. 1 als vereinfachte Illustration).



Abbildung 1: Schematische Abbildung und Foto des GLT-Lagers in Hattorf

Für einen regionalen Kunden der Automobilindustrie stellt dieses Lager eine wichtige Puffermöglichkeit dar, um das täglich benötigte Volumen von circa 4.000 GLT bedarfsgerecht an der Montagelinie bereitzustellen. Um diesen täglichen Umschlag von 4.000 GLT (sowohl wareneingangsseitig als auch warenausgangsseitig) gerecht zu werden, erfolgt die Steuerung der Flurförderzeuge unter Vorgabe eines Staplerleitsystems des Kunden. Wichtigster Bestandteil dieses Staplerleitsystems ist eine Vorgabe von 13 Staplerrevieren. Diese Reviere spiegeln die physischen Lagerflächen wider, in denen sich Flurförderzeuge bewegen dürfen und Auslagerungen tätigen. In Teilen sind diese Reviere und die damit verbundene Steuerung der Lagerausgangsbewegungen tagesaktuell gehalten, einige Reviervorgaben sind jedoch sukzessive je nach Bedarf im Lauf der Zeit ergänzt worden, so dass die genauen Zusammenhänge der Informationsflüsse zum Untersuchungszeitpunkt (Oktober 2016) nicht gänzlich durchdrungen werden konnten (vgl. hierzu Abb. 2).

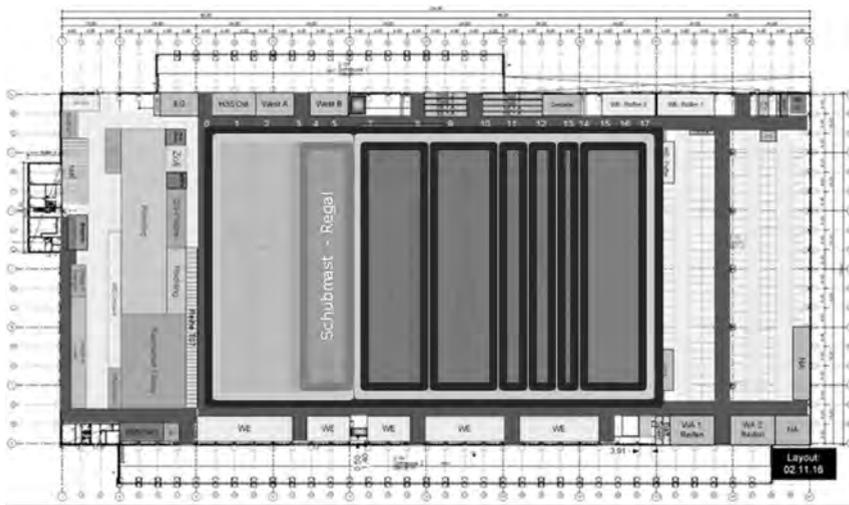


Abbildung 2: Schematische Darstellung der aktuellen Revierstruktur

Auslöser für das Durchführen der Simulationsstudie ist der operative Wunsch nach einer Performancesteigerung des Lagersystems – und hier insbesondere die gezielte Anpassung von Prozessen durch die Verbesserung der o. g. Revierstruktur im Warenausgang. Diesbezüglich besteht bereits ein subjektives Empfinden der operativen Leitung vor Ort, die sich durch die Hilfe der Simulation eine Bestätigung oder ein Widerlegen dieser subjektiven Einschätzung erhofft. Unter der Berücksichtigung der nicht transparenten und eingangs kurz erwähnten Revierstruktur und dem Wunsch der warenausgangsseitigen Performancesteigerung wird die Entscheidung getroffen, das Lager mit sämtlichen Bewegdaten in einem Simulationsmodell abzubilden. Kern dieser Analyse ist entsprechend der Warenausgangsbereich, in dem die Staplerverkehre durch eine Reviereinteilung verwaltet werden. Durch die verschiedenen Reviere ist jedes Flurförderzeug einem definierten Bereich des Lagers zugeordnet. Diese Einteilung soll in mehreren Experimenten variiert werden, um die bestmögliche Revierstrukturierung – das heißt Anzahl und Aufteilung der Reviere mit der entsprechend „besten“ Zuordnung von

Staplern zu diesen - ableiten zu können. Wie in den vorherigen Abschnitten bereits beschrieben, wird im konkreten Beispiel von einem klassischen Vorgehen mit dem Geben einer Handlungsempfehlung und dem darauffolgenden „Zurückziehen“ der Simulationsexperten verzichtet. Das gesamte Projekt wird explizit so geplant, dass die Simulation durchgängig ihre Anwendung findet und die Unterstützung durch die Simulationsexperten bis zur tatsächlichen Umsetzung der Erkenntnisse in den Prozess gewährleistet wird.

5 Die Nutzung der Simulation als Methode in der Umsetzungsphase von Logistikplanungen

Um den Nutzen der Simulation in der Umsetzungsphase aufzuzeigen, wird anhand des konkreten Fallbeispiels zunächst das Vorgehen in der Projektphase, auch in Abgrenzung zum „üblichen“ Vorgehen in Simulationsstudien, erläutert. Im Anschluss hieran werden die daraus resultierenden Vorteile im konkreten Projekt beschrieben und als Diskussionspunkt für ein grundsätzliches Erweitern des Blickwinkels auf Simulationsstudien dargestellt.

5.1 Beschreibung des Simulationsprojekts Hattorf

Das Vorgehen zur Zielerreichung für dieses Projekt wurde bereits in der Projektplanung über das Geben einer Handlungsempfehlung auf Basis der Modellergebnisse hinaus ausgelegt, so dass die Modellergebnisse sukzessive mit den Projektbeteiligten vor Ort evaluiert und somit auch nach dem Abschluss der Experimente-Phase weiter im Rahmen der Simulationsstudie Beachtung finden können. Somit ist bereits bei der Modellierung dem Anspruch, das Modell auch in der Phase der tatsächlichen Umsetzung (Umstellungen der IT-gestützten Steuerungen im Warenausgang zur Verbesserung der Performance der eingesetzten Ressourcen) nutzen zu können, Rechnung zu tragen. Konkret werden hierzu alle Modellierungsschritte sowie die für das Modell notwendigen Simulationsdaten und -parameter mit den vor Ort beteiligten Personen gemeinsam erarbeitet. Die Modellentwicklung sowie die Auswirkung unterschiedlicher Einstellungen werden ebenfalls gemeinsam in hierfür angesetzten Workshops sukzessive vorgenommen. Ziel dieser Einbindung ist das Schaffen einer frühen Akzeptanz hinsichtlich des Modells und somit auch hinsichtlich der Modellergebnisse. Wie bereits eingangs dieses Artikels beschrieben, ist dieses Vorgehen auch in gängigen Vorgehensmodellen zur Simulation bereits Gegenstand der Betrachtung, jedoch nicht als wesentlicher Einflussfaktor für die tatsächliche Umsetzungsphase weiter beschrieben. Getrieben vom Vorhaben, eine transparente Kommunikation zwischen verantwortlichem Personal vor Ort und dem/den Simulationsexperten für die tatsächliche Umsetzung der Simulationsergebnisse zu schaffen, zeigen sich die Meilensteine der Simulationsstudie in untenstehender Abbildung 3. Die Meilensteine in Abbildung 3 zeigen, dass im Anschluss an das Geben der Handlungsempfehlung noch weitaus mehr Aufgaben zur Umsetzung selbiger als Bestandteile der gesamten Simulationsstudie zu nennen sind (vgl. hierzu Markierung in Abb. 3). In Relation zur Gesamtprojektdauer (Simulationsstudie und operative Umsetzung der Simulationsergebnisse) liegt der Zeitpunkt der Übermittlung einer Handlungsempfehlung bei etwa 50 % der gesamten Projektdauer. Die restliche Projektzeit wird für die Vorbereitung, die Ausplanung, operative Tests sowie die kontinuierliche Abstimmung bzw. Lenkung der Umsetzung „verbraucht“, bevor in

einem letzten Schritt tatsächlich Reviere umgestellt und damit ad hoc Ressourcen eingespart werden konnten.

Dauer der Simulationsstudie [Tage]	Zeitpunkt	Beschreibung	Nutzung Simulationsmodell	"üblicherweise" im Vorgehen von Simulationsstudien
0	14.11.2016	Anfrage-Termin zur Simulation mit der Niederlassungsleitung	Nein	Ja
9	23.11.2016	Entscheidung zur Durchführung der Simulationsstudie	Nein	Ja
9	23.11.2016	Datenbeschaffung und Modellbildung	Ja	Ja
32	16.12.2016	Daten, Parameter etc. "Beschaffung" abgeschlossen	Ja	Ja
38	22.12.2016	Vorstellung erster Ergebnisse und Verfeinerung des Experimentplans	Ja	Ja
65	18.01.2017	Vorstellung der finalen Ergebnisse und Empfehlung einer Umsetzungsvariante	Ja	Ja
102	24.02.2017	Besprechung der Simulationsergebnisse nach weiterer Verfeinerung der Simulationsparameter und Empfehlung einer Umsetzungsvariante	Ja	Ja
107	01.03.2017	Entwicklung eines Umsetzungsplans zur Umsetzung einer neuen Revierstruktur und Verbesserung des Systems	Nein	Nein
121	15.03.2017	Vorbereitung eines Testlaufs, zur Absicherung des Systemverständnisses	Ja	Nein
141	04.04.2017	Umsetzung eines Testlaufs	Nein	Nein
148	11.04.2017	Erneute Anpassung der Simulationsparameter und Untersuchung weiterer Simulationsszenarien aufgrund des "Vor-Ort-Feedbacks"	Ja	Nein
156	19.04.2017	Lenkungstermin zum Projektverlauf mit allen beteiligten Personen	Nein	Nein
156	19.04.2017	Evaluierung Testergebnisse und Analyse unerwarteter Systemeigenschaften. Einbindung des Kunden in die Analysephase	Ja	Nein
169	02.05.2017	Lenkungstermin zum Projektverlauf	Nein	Nein
190	23.05.2017	Schulung im IT System aufgrund weiterer offener Fragestellungen aus dem ersten Testlauf	Nein	Nein
211	13.06.2017	Umsetzung der favorisierten und angepassten Handlungsempfehlung Reduzierung der Reviere und Ressourcen (Personen + Stapler)	Ja	Ja

Abbildung 3: Meilensteine zur Umsetzung der Simulationsergebnisse

5.2 Beschreibung des Ergebnisses und der Vorteile

Die Umsetzungsphase des Projekts obliegt im Normalfall dem Verantwortungsbereich des vor Ort tätigen operativen Personals. Dazu gehören neben der Niederlassungs- und Betriebsleitung auch ein Logistikplaner sowie mehrere Schichtleiter, Teamleiter und Mitarbeiter der Systemsteuerung.

Generell liegt die Planung der Umsetzung sowie die pro aktive Kommunikation in die entsprechenden Hierarchieebenen in der Verantwortung des o. g. Personenkreises, jedoch erweist es sich in der Umsetzungsphase als hilfreich, auch auf den Informationshintergrund der Simulationsexperten zurückzugreifen sowie mögliche weiterführende Analysen mit Hilfe des Simulationsmodells durchführen zu können. Im konkreten Fallbeispiel erhält die operative Leitung demnach bei sämtlichen projektbezogenen Problemstellungen Unterstützung bezüglich des Systemverhaltens. Als Beispiel lässt sich die Verteilzeit der Staplerfahrer heranziehen. Diese wird durch

die operative Leitung zu Beginn der Simulationsstudie in einem überdurchschnittlich hohen Wertebereich als fester Systemparameter angesetzt. Die Simulation zeigte in diesem Zusammenhang, dass diese hohen Verteilzeiten nicht durch die persönlichen Arbeitsweisen der Mitarbeiter hervorgerufen werden, sondern systemseitig die Staplerflotte nicht optimal ausgelastet werden. Aus diesem Grund entstanden Totzeiten, die zu einer Anhebung der persönlichen Verteilzeit führten. In diesem Zusammenhang wird folglich für die weitere Simulationsstudie variabel mit dem Parameter Verteilzeit verfahren und mit der operativen Leitung die Zusammenhänge „Staplerflottenauslastung vs. persönliche Verteilzeit“ diskutiert.

Neben der Kommunikation mit der operativen Leitung erfolgt die Einbindung jeglicher Hierarchiestufen in den geplanten Prozess der Veränderung durch eine umfangreiche Information. Die direkte Kommunikation zwischen operativ verantwortlichen Personal und Simulationsexperte(n) bleibt zwar weiterhin bestehen, zusätzlich erfolgt jedoch eine gezielte Ausdehnung in niedrigere operative Hierarchie-Ebenen bis hin zum gewerblichen bzw. kaufmännischen Personal, das letztendlich die physische und administrative Abwicklung, also sämtliche Warenbewegungen, steuert. In dem konkreten Fall werden die Steuerungslogiken dieses Personals, auch „Leitstand“ genannt, simulationseitig vereinfacht dargestellt und mit dieser gemeinsam abgestimmten vereinfachten Logik die Simulationsexperimente gefahren. Es stellte sich heraus, dass der Faktor „Mensch“ einen erheblich größeren Einfluss auf die Systemsteuerung bewirkt, als zu Beginn der Simulationsstudie angenommen. Der Prozessablauf wird simulationseitig somit zwar vereinfacht, praktisch führt die ungewohnt vereinfachte Steuerung jedoch vorerst nicht zur gewünschten Verbesserung der Systemleistung sowie -transparenz. Um in diesem Zusammenhang ein einheitliches Verständnis des kompletten beteiligten Personenkreises aufzubauen, werden im Nachgang mehrere Workshops durchgeführt, die die verschiedenen Auswirkungen der Systemparameter im Zusammenhang mit der Wirkweise des Leitstandsmitarbeiters klarstellten. Dieses Vorgehen zeigt, dass die Umsetzbarkeit einer Handlungsempfehlung des Simulationsexperten teilweise nicht gegeben ist und weitere Einflussparameter bzw. Faktoren während der Umsetzungsphase berücksichtigt werden müssen. Da das konkrete Fallbeispiel stark durch das IT-System des Kunden und die Unterstützung des Kunden geprägt ist, besteht weiterhin die Möglichkeit, während der Umsetzungsphase eine Kommunikationsstruktur bestehend aus Kunde, Simulationsexperte und operativer Leitung herzustellen. Hiermit wird eine Verbesserung des Systemverständnisses auf beiden Seiten (Rudolph Logistik Gruppe und Kunde) hergestellt. Auf diese Art und Weise bildet der Simulationsexperte quasi die Schnittstelle, welche die operative Leitung dahingehend unterstützt, das Projekt kontinuierlich in die richtige Richtung zu lenken. Zusammengefasst hat die Einbindung der Simulationsexperten in die Umsetzungsphase den Vorteil die Kommunikation, den Informationsfluss und das Systemverständnis zu verbessern, um bei sämtlichen Beteiligten die notwendige Transparenz zu schaffen und die Simulationsergebnisse „korrekt“ umzusetzen. Im Idealfall verankern sich die Erkenntnisse derart im Umsetzungsteam, dass die Leistung auch nachhaltig zufriedenstellend erbracht bzw. darüber hinaus noch verbessert werden kann.

6 Schlussbetrachtung – Ergebnisse und offene Fragen

Das in diesem Artikel beschriebene Beispiel – das insbesondere aus den Anforderungen der Praxis getrieben ist – hat die Notwendigkeit und Vorteile der „Ausdehnung“ der klassischen Betrachtung von Simulationsstudien gezeigt. Ausgehend von einer Abgrenzung zu bestehenden Arbeiten galt es aufzuzeigen, inwiefern eine weiterführende Begleitung der operativen Entscheidungsträger nach dem Geben einer Handlungsempfehlung als sinnvoll erscheint. Der hier beschriebene Fall verdeutlicht plakativ (u. a. auch durch die einfache Gegenüberstellung der Zeiträume vom Start der Simulationsstudie bis zum Ableiten der Handlungsempfehlung sowie vom Geben dieser Handlungsempfehlung bis hin zur Umsetzung selbiger), welche Bedeutung der o. g. Ausdehnung der klassischen Betrachtung von Simulationsstudien zukommt. Für eine Bestätigung dieser am konkreten Beispiel aufgezeigten Bedeutung muss in weiteren Untersuchungen eine gezielte Betrachtung von Simulationsstudien über das Geben der Handlungsempfehlungen hinaus erfolgen. So kann eine Diskussion über das „tatsächliche“ Ergebnis der Simulation in einem geeigneten wissenschaftlichen Rahmen mit dem Ziel, über eine Anpassung/ Erweiterung der klassischen Vorgehensmodelle zu Simulationsstudien nachzudenken, weitergeführt werden. Ferner sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Überlegung hin zur Erweiterung des Fokus´ der Simulation ebenfalls für andere Planungsmethoden, wie z. B. die Wertstromanalyse, denkbar wäre. Auch bei anderen Planungsmethoden liegt der Schwerpunkt auf der Analyse des Ist-Zustands und darauffolgenden auf dem Ableiten eines verbesserten Soll-Zustands. Wie dieser Soll-Zustand jedoch methodisch unterstützt zu erreichen ist, bleibt meist unerwähnt.

Literatur

- Abel, D.: Bewertungsmethodik zur Einflussanalyse der Informationsqualität auf die Simulationsergebnisse in Produktion und Logistik. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Produktionsorganisation und Fabrikplanung. Band 4, Aachen Shaker 2013.
- Law, A. M.: Simulation Modeling and Analysis. 5. Aufl., Ney York McGraw-Hill Education 2014.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik - Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer 2008.
- Rudolph, T.; Abel, D.: Die Gestaltung effizienter Logistikprozesse. In: Kille, C. (Hrsg.): Navigation durch die komplexe Welt der Logistik - Texte aus Wissenschaft und Praxis zum Schaffenswerk von Wolf-Rüdiger Bretzke, Wiesbaden Springer-Gabler 2014, S. 73-83.
- Süß, T.; Fischer, M.; Huber, D.; Laroque, C.; Dangelmaier, W.: Ein System zur aggregierten Visualisierung verteilter Materialflusssimulationen. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.): Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Band 252, Paderborn HNI Verlagsschriftenreihe 2009, S. 111-126.
- VDI 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.
- Wiese, J.: Simulationsgestützte Analyse der internen Warenflusskette in einem Unternehmen der Fleischindustrie. In: Sucky, E. (Hrsg.): Logistik und Supply Chain Management, Band 11, Bamberg University of Bamberg Press 2014, S. 5-16.

Approaching the Reduction of Uncertainty in Production System Design through Discrete-Event Simulation

Untersuchung der Reduktion von Unsicherheit im Produktionssystem- Design durch ereignisdiskrete Simulation

Asier Etxagibel Larrañaga, Erik Flores García, Mälardalen University, Eskilstuna
(Sweden), asier.etxagibel@mdh.se, erik.flores@mdh.se

Abstract: The presence of uncertainties associated to the introduction of novelty and significant change challenge manufacturing competitiveness. Addressing this issue, the purpose of this qualitative case study is to examine the uncertainties reduced by Discrete-Event Simulation (DES) use during the design of a production system when significant changes are introduced at a manufacturing company. The results of this paper, based on empirical findings from a Swedish manufacturing company, reveal the presence of eight different uncertainties affecting the design of a production system including state, technical, environmental, system, temporal, structural, epistemic, and definition. Empirical results also show how DES contributed to reducing technical, structural, epistemic, and definition uncertainties. This paper contributes to existing knowledge by proposing a model that aids decision makers anticipate the type of uncertainty faced and the suitability of DES use as an uncertainty reducing activity during significant change introduction.

1 Introduction

Modern day manufacturing companies can no longer rely on the use of everyday practices to secure a strong market position (Michalos et al. 2010). Instead, manufacturing firms are increasingly required to introduce significant changes in a production system to gain a competitive advantage (O'Connor and Rice 2013). To achieve this, literature has proposed the use of both production system design (Pisano and Shih 2009) and DES (Law 2015). However, past studies reveal that when significant changes are introduced the presence of uncertainties challenge the characterization of a production system during its design. In this context uncertainty arises from the changes in requirements, products, challenges, or expectations that are different from what currently exists (Bellgran and Säfsten 2010). Thus, DES theory recommends that uncertainty be reduced to increase knowledge during modelling and diminish potential inaccuracies (Oberkamp et al. 2002).

Nonetheless, results from past DES studies underscore what seems to be a tenuous understanding of uncertainty reduction when significant changes are introduced during production system design. A key limitation of current DES publications is that these have approached the reduction of uncertainty by focusing on the selection of values of design parameters and not on issues that arise when such parameters must first be identified (Wynn et al. 2011). For example, Gien and Jacqmart (2005) investigated the presence of uncertainty as incorrect or inaccurate data inputs for DES models, and Kleijnen et al. (2011) found which uncertain parameters in a DES model lead to an uncertain design. This shows that, regardless of establishing what mechanisms facilitate the reduction of uncertainty once DES model parameters have been chosen, it remains important to determine how uncertainties challenge the production system characterization will be dealt with prior to model development. This issue is significant as good theory must specify both what and how an issue occurs (Karlsson 2010). Furthermore, addressing this gap would help establish which of the presently known types of uncertainty may be resolved through DES use, and thereby determine the appropriateness of a DES based analysis in conditions of high uncertainty (Carrillo and Gaimon 2002; Haveman and Bonnema 2015).

Accordingly, the purpose of this paper is to examine the uncertainties reduced through DES use during the design of a production system when significant changes are introduced at a manufacturing company. This paper contributes to existing knowledge by presenting a model that informs decision makers about the type of uncertainty faced during significant change introduction and suggest whether DES use is a suitable alternative to the reduction of these uncertainties during production system design. Empirically, data is collected from a real-time case study at a Swedish manufacturing company where a multi-product assembly system was developed under conditions of significant change and high uncertainty. The structure of the paper is the following. Section 2 presents a frame of reference. The method through which research was performed is described in Section 3. The empirical findings and analysis are presented in sections 4 and 5 respectively. Finally, conclusions and future research venues are presented in Section 6.

2 Frame of Reference

2.1 Production System Design

According to recent findings, manufacturing companies can only sustain a competitive advantage by developing the ability to introduce significant changes in both products and production system (Frishammar et al. 2012). These significant changes include novel production and organizational processes as well as component technologies that are different from and new to a manufacturing company's current capabilities (Holweg 2008). Production system design includes the conception and planning of the overall set of elements and events constituting a production system, together with rules for their relationship in space and time (Chisholm 1990). Hence, production system design has been regarded as a problem-solving activity where significant changes can be introduced into the production system. This is achieved by selecting equipment, information flow, work procedures and related decisions in accordance to the desired objectives (Bellgran and Säfsten

2010). However, a growing body of literature suggests that the introductions of significant changes leads to uncertainties that challenge a manufacturing company's characterisation of a production system (Parida et al. 2016).

Uncertainty has been defined as the gap between the information that designers need for formulating a proper decision and the information that they actually have (Galbraith 1973). In a context of significant change introduction uncertainty arises from an inherent lack of information related to inclusion of new elements into a production system (O'Connor and Rice 2013). Paradoxically, even though companies face high levels of uncertainty when introducing significant changes, a poor management of information is noted. This lack of information has been attributed to deficient information gathering, communication and usage (Bruch and Bellgran 2013). Accordingly, the reduction of uncertainty is desirable and includes generating agreement on what there is uncertainty about and acquiring additional information about agreed upon issues (Koufteros et al. 2005).

Reducing uncertainty requires first creating awareness of the different types of uncertainties and then selecting a suitable approach that leads to a state of increased information (Carrillo and Gaimon 2002). From a production systems perspective, uncertainties have been originally grouped into environmental or system based on the whether these develop beyond or within the boundaries of a production system respectively (Ho 1989). However, further research has revealed a diversity of uncertainty types that go beyond this classification, these are presented in Table 1.

Table 1: *Types of uncertainty*

Author	Type	Description
Milliken (1987)	State	Limited understanding of changes in environment
	Effect	Inability predicting the consequences of changes
	Response	Lack of knowledge of available response options
Gerwin (1988)	Technical	Unknown precision and reliability of processes
	Financial	Inability to determine the return on investment
	Social	Questions concerning the required support system
Rowe (1994)	Temporal	Absence of information about future or past states
	Structural	Uncertainty due to system complexity
	Metrical	Doubtful and variable measurement process
McManus and Hastings (2005)	Translational	Difficulties explaining results across the company
	Epistemic	Facts that are not known or known imprecisely
	Definition	System has not been decided/specified
Lane and Maxfield (2005)	Truth	Inability to prove if an alternative is true or not
	Semantic	Doubts on what the meaning of an alternative is
	Ontological	Actors' ontology based uncertainty
Clarkson and Eckert (2010)	Known	Variability in past cases seen as a distribution
	Unknown	Unexpected internal and/or external uncertainties

2.2 Discrete-Event Simulation

DES has been used extensively in multiple sectors of manufacturing (Jahangirian et al. 2010). The use of DES in the analysis of a production system originates from the selection of relevant information and development of understanding necessary to establish causal relations between elements in a such a system without disrupting its operation (Law 2015). Two distinct approaches to the reduction of uncertainty through DES use emerge from current literature.

First, DES use as confirmation of a selected alternative including all major decisions that indicate what a production system will look like and how will a production system operate, as shown by Jagstam and Klingstam (2002). Here the use of DES in late stage of production system design exists as a contingency to poor input data that may lead to a weak simulation results (Robinson 2002). Thus, DES contributions to the reduction of uncertainty focus on a sufficiently narrow selection of parameters and hence conditions of low uncertainty.

Opposite to this perspective, literature suggests the use of DES early in production system design. Here limited commitment to the characteristics of a production system exist and uncertainty is high. Consequently, this approach assumes a continuous use of DES as a way of gradually reducing uncertainty as suggested by Oberkampff et al. (2002) and Jagstam and Klingstam (2002). This approach is underpinned non-exclusive strategies which have been extensively addressed in literature. Such approaches include and are not limited to modelling a production system while incurring in assumptions and simplifications (Robinson 2014), accounting for uncertainty as an experimental factor through sensitivity analysis (Durieux and Pierreval 2004; Kleijnen et al. 2011) or fuzzy data intervals (Gien and Jacquart 2005).

3 Research Methodology

To achieve the purpose of this paper, a real-time case study was conducted at a Swedish manufacturing company. A case study method was chosen to provide understanding of a real world context when a lack of control over events was anticipated (Yin 2013), and contribute with empirical evidence to current understanding (Voss et al. 2002; Eisenhardt and Graebner 2007). Because uncertainty was expected to change over time as a result of design, a real-time approach was selected to investigate the same phenomena at multiple points (Karlsson 2010). Thus, data was collected longitudinally as events took place (Eisenhardt and Graebner 2007). Case study data was collected between February and May 2016. Multiple sources of evidence were used including company documents describing the design of the production system. Data was also acquired through participatory observation in ten one hour meetings and three full day workshops. Participatory observations focused on identifying uncertainty and its reduction while a cross-functional team characterized the production system during its design. Also, data was collected during the development of six different DES models. DES model development followed the steps in a simulation study suggested by (Law 2015). Input data used for DES model development was based on a combination of historical, anecdotal and observational data (Chung 2003). Data collected for the development of DES models included assembly times per station, operator quantity, shifts, capacities, production demand, and disturbances. A white-

box validation technique was employed to verify the DES models (Robinson 1997) while verification included face validation and black box testing (Balci 1994). Uncertainty identification was underpinned by type and definition of uncertainties presented in the frame of reference. Data was scanned for issues that revealed a lack of information necessary for production system characterization during design. Then, activities that contributed to the acquisition of information were pinpointed. All steps in a simulation study including problem formulation, data collection, model definition, validation, verification, experimental design, runs, analysis, documentation, presentation, and implementation were inspected for the presence of uncertainty and its reduction. Data were analysed iteratively following the stages of data condensation, data display, and conclusion drawing (Miles et al. 2013). Analytic generalization was prioritized to address concerns about generalizability of research results (Yin 2013). First a theoretical framework was developed to gain a basic logic about uncertainty and its reduction. This general logic was compared with data drawn from an empirical context. To address concerns about validity of research, key concepts about uncertainty types were identified to establish a chain of evidence based on multiple sources of data (Maxwell 2012). Theory was used to gain an understanding on uncertainty reduction through DES use. This was examined in relation to case findings to understand occurrences and rule out rival explanations.

4 Empirical Findings

A real-time case study was conducted at a Swedish manufacturing company from the heavy vehicle industry. The case study followed a production system design project where substantial modification to an existing production system were conceived. Here the manufacturing company decided to change its product specific assembly system to a multi-product assembly one where three distinct product families and 600 different variants could be assembled. These significant changes to the assembly systems were seen as means for the company to increase its competitive advantage by shortening lead time to customers, reducing manufacturing footprint, and providing a common architecture for its products.

4.1 Case Study Findings

Case study documents show the limited experience on the design and operation of a multi-product assembly system at the manufacturing site. Site visits and participatory observation revealed that no major modifications had taken place in the existing production system since its implementation. Collected data shows that the transition from single product assembly lines to mixed model assembly one meant an unavoidable increase in variation in the multi-product assembly system. This included diverse assembly operations, increased number of products and an increment in the difference between assembly times within each assembly station. Furthermore, empirical data stemming from documents, site visits, workshops and DES model development show the presence of uncertainties affecting a complete characterization of the designed assembly system. These uncertainties were distinguished by a lack of information that came as a consequence of the introduction of changes necessary to implement a multi-product assembly line. Targeting the increased variation and acknowledging the limited insight into the

consequence of introducing a multi-product assembly system, six different DES models were developed during production system design. Following different purposes, the models were divided into three different phases. In the first phase the current production system was simulated (Model 0), serving as a basis for comparison with the production system under design according to performance measures i. e. total production and lead time. In the second phase, Model 0 was compared against the future multi-product assembly line (Model 1). The aim of this phase was to verify whether the multi-product assembly line would be able to meet the current demand requirements, using the same input data as the previous model. The third phase, consisting on the four different models (Model 2 to Model 5), simulated and analysed different future state design decisions proposed by the company. From Model 2 onwards, which aimed to simulate the future state according to the company specifications, the subsequent scenarios were cumulatively modelled, meaning that Model 3 was an enhancement of Model 2, and so on. The buffer analysis simulated in the Model 3 unveiled a trade-off in form of an increase of 1 % in the total production for an increase of 15 % in the lead time. Through Models 4 and 5, the production system modelled proofed to be resilient enough to handle variation in both demand and product mix, with a minor decrease in the total output.

5 Analysis and Discussion

Based on the frame of reference, a model showcasing the relation between uncertainty and DES is proposed. This model displays the uncertainty types observed when introducing significant changes into the production system, and based on the empirical finding of the case study, suggests which of these uncertainties are reduced via DES. From the 19 uncertainty types defined in the frame of reference, eight of them were addressed through DES use in the case study. This eight uncertainty types include state, technical, environmental, system, temporal, structural, epistemic and definition. Table 2 summarizes the uncertainty types in the empirical study.

Table 2: *Types of uncertainties observed during the production system design*

Type	Uncertainties observed
State	Unknown future demand, new product introduction and competitors.
Technical	Unclear if the new production system will meet the requirements.
Environmental	Unknown product demand variation, model and production mix, product design changes and new product introduction.
System	Lack of knowledge about production process related to significant change introduction.
Temporal	Unclear future state and poor historical documentation.
Structural	Complex product assembly, numerous parts and customer options.
Epistemic	Poor information about the current system and inexperience performing production system design.
Definition	Objectives, common visions and requirements not clearly defined.

Based on these results, Figure 1 shows a model describing how the uncertainties above are reduced when using DES. In this model, identified uncertainties are grouped based on Ho (1989), including external (environmental) and internal (system) uncertainties, here temporal uncertainty affects both classifications.

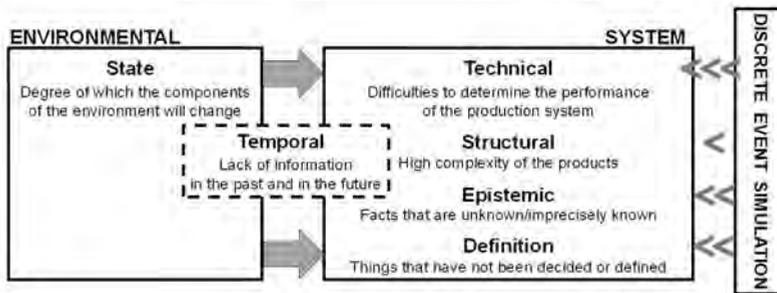


Figure 1: Model showing reduction of uncertainties through DES use

The model shows that, the information provided by the simulation study to reduce uncertainty in production system design can be divided into two different categories: the output of the models in form of key performance indicators (KPIs) and the simulation modelling process itself. On the one hand, in line with previous studies (Durieux and Pierreval 2004), the empirical study not only revealed that the design alternatives were viable, but it also predicted a 3 % of increase in the total production compared to the current situation. Besides, relevance of factors such as seasonality and disturbances previously not considered in the early stages of the design was found out. In fact, Model 1 showed a decrease of 6.6 % of the total production attributed to the two discoveries. Model 3, whose aim was to overcome these factors, revealed a potential 1 % total production further increase by using stock buffers. All in all, the KPIs provided information about the behaviour of the system, and thus reducing the technical and epistemic uncertainties in high degree (Gerwin 1988; McManus and Hastings 2005). Empirical evidence suggests that the modelling process also brought a decrease in the uncertainty level. Discrepancies between management and operational level among capacity and disturbance behaviour was solved by involving cross-functional team member backgrounds in the project, where steps like the problem formulation or data gathering decreased in a high degree the definition uncertainty (McManus and Hastings 2005). In line with the findings of Kang et al. (2015), the visual aspects of DES made easier to present information and results to different backgrounds, ensuring a common vision towards the uncertainties affecting the production system in the project team and thus, decreasing definition uncertainty and improving the communication across the company (Bruch and Bellgran 2013). Concerning the conceptual model building, the simplifications of the system and subsystems made the overall introduction of significant changes more understandable and accessible to the different levels of the organization, decreasing in a lower degree the structural uncertainty (Rowe 1994). Environmental uncertainties were not reduced through DES, but their consequences understood. Nevertheless, DES helped understand the effects that changes in demand and new product introductions would have on the production system, and thereby reduce temporal (Rowe 1994) and effect uncertainties (Milliken 1987).

6 Conclusions and Future Research Venues

The purpose of this paper was to examine the uncertainties reduced by DES use during the design of a production system when significant changes are introduced at a manufacturing company. Based on the result from a real-time case study, this paper presented a model identifying the uncertainties present during significant change introduction, where uncertainties of technical, structural, epistemic, and definition type were reduced during the design of a production system through DES use. This model contributes to existing knowledge focusing on the early use of DES during production system design in conditions of high uncertainty described in the frame of reference. Results suggest that as far as identification of uncertainty is concerned, theory driven categories of uncertainty are meaningful to understand the difficulties of characterization during significant change introduction. Further, revealing which of these uncertainties are accounted for by DES complements current understanding about the mechanisms that facilitate the reduction of uncertainty once DES parameters have been chosen. Also, the results of this paper show the usefulness of DES in the acquisition of information relevant to production system design, situation achieved by predicting the future system performance and behaviour and aiding in the communication through the organization with the visual aspects. Managerial implications of this paper strongly focus on the contingency of uncertainties that stem from introducing significant production system changes. Thus, the presented model serves as a guideline for decision makers to anticipate the types of uncertainty and the applicability that DES use for their reduction. Future research includes confirmation of results based on additional cases and industries that strengthen the insight provided by this single case study. Research results indicate the importance of production system design and DES use when addressing uncertainty reduction. Future research could describe the necessary conditions that facilitate this. Finally, the results of this paper suggest that different levels of uncertainty reduction occur when DES is used. Thus, future research could illuminate how and why this occurs.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the contributions from the participants in the anonymous company. Financial support from the Swedish Knowledge Foundation (KKS) to the industrial graduate school 'INNOFACTURE' is also gratefully acknowledged. The study was performed in the context of the XPRES framework at Mälardalen University.

References

- Balci, O.: Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study. *Annals of operations research* 53 (1994) 1, pp. 121-173.
- Bellgran, M.; Säfsten, E.K.: *Production development: design and operation of production systems*. New York: Springer Science & Business Media 2010.
- Bruch, J.; Bellgran, M.: Characteristics affecting management of design information in the production system design process. *International journal of production research* 51 (2013) 11, pp. 3241-3251.

- Carrillo, J.E.; Gaimon, C.: A framework for process change. *IEEE Transactions on Engineering Management* 49 (2002) 4, pp. 409-427.
- Chisholm, A.: Nomenclature and definitions for manufacturing systems. *CIRP annals* 39 (1990) 2, pp. 735-742.
- Chung, C.A.: *Simulation modeling handbook: a practical approach*. Boca Raton: CRC press 2003.
- Clarkson, J.; Eckert, C.: *Design process improvement: A review of current practice*: Springer Science & Business Media 2010.
- Durieux, S.; Pierreval, H.: Regression metamodeling for the design of automated manufacturing system composed of parallel machines sharing a material handling resource. *International Journal of Production Economics* 89 (2004) 1, pp. 21-30.
- Eisenhardt, K.M.; Graebner, M.E.: Theory Building from Cases: Opportunities and Challenges. *Academy of management journal* 50 (2007) 1, pp. 25-32.
- Frishammar, J.; Kurkkio, M.; Abrahamsson, L.; Lichtenthaler, U.: Antecedents and consequences of firms' process innovation capability: a literature review and a conceptual framework. *IEEE Transactions on Engineering Management* 59 (2012) 4, pp. 519-529.
- Galbraith, J.R.: *Designing complex organizations*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. 1973.
- Gerwin, D.: A theory of innovation processes for computer-aided manufacturing technology. *IEEE Transactions on Engineering Management* 35 (1988) 2, pp. 90-100.
- Gien, D.; Jacqmart, S.: Design and simulation of manufacturing systems facing imperfectly defined information. *Simulation Modelling Practice and Theory* 13 (2005) 6, pp. 465-485.
- Haveman, S.P.; Bonnema, G.M.: Communication of simulation and modelling activities in early systems engineering. *Procedia computer science* 44 (2015), pp. 305-314.
- Ho, C.-J.: Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. *The International Journal of Production Research* 27 (1989) 7, pp. 1115-1135.
- Holweg, M. The evolution of competition in the automotive industry. In: *Build to order*. Springer 2008, pp. 13-34.
- Jagstam, M.; Klingstam, P.: A handbook for integrating discrete event simulation as an aid in conceptual design of manufacturing systems. E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, San Diego, 2002. pp. 1940-1944.
- 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, pp. 1-13.
- Kang, P.S.; Aboutaleb, A.; Duffy, A.; Embley, T.; Glenn, J.; Adams, C. Discrete Event Simulation to Reduce the Effect of Uncertainties on Project Planning. In: *29th European Simulation and Modelling Conference*, Leicester, UK, 2015, pp. 26-28.
- Karlsson, C.: *Researching operations management*. Routledge 2010.
- Kleijnen, J.P.; Pierreval, H.; Zhang, J.: Methodology for determining the acceptability of system designs in uncertain environments. *European Journal of Operational Research* 209 (2011) 2, pp. 176-183.

- Koufteros, X.; Vonderembse, M.; Jayaram, J.: Internal and External Integration for Product Development: The Contingency Effects of Uncertainty, Equivocality, and Platform Strategy. *Decision Sciences* 36 (2005) 1, pp. 97-133.
- Lane, D.A.; Maxfield, R.R.: Ontological uncertainty and innovation. *Journal of evolutionary economics* 15 (2005) 1, pp. 3-50.
- Law, A.M.: *Simulation modeling and analysis*, 5. ed. New York: McGraw-Hill 2015.
- Maxwell, J.A.: *Qualitative research design: An interactive approach: An interactive approach*. Thousand Oaks, CA: Sage 2012.
- McManus, H.; Hastings, D.: A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems. INCOSE International Symposium, Rochester, 2005. pp. 484-503.
- Michalos, G.; Makris, S.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G.: Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2010) 2, pp. 81-91.
- Miles, M.B.; Huberman, A.M.; Saldana, J.: *Qualitative data analysis: A methods sourcebook*. Thousand Oaks, CA: SAGE 2013.
- Milliken, F.J.: Three types of perceived uncertainty about the environment: State, effect, and response uncertainty. *Academy of Management review* 12 (1987) 1, pp. 133-143.
- O'Connor, G.C.; Rice, M.P.: A comprehensive model of uncertainty associated with radical innovation. *Journal of Product Innovation Management* 30 (2013) S1, pp. 2-18.
- Oberkampff, W.L.; DeLand, S.M.; Rutherford, B.M.; Diegert, K.V.; Alvin, K.F.: Error and uncertainty in modeling and simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 75 (2002) 3, pp. 333-357.
- Parida, V.; Patel, P.C.; Frishmar, J.; Wincent, J.: Managing the front-end phase of process innovation under conditions of high uncertainty. *Quality & Quantity* (2016), pp. 1-18.
- Pisano, G.P.; Shih, W.C.: Restoring American Competitiveness. *Harvard business review* 87 (2009) 7/8, pp. 114-125.
- Robinson, S.: Simulation model verification and validation: increasing the users' confidence. In: Andradottir, K. Healy, D. Withers, B. Nelson: *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation*. Atlanta 1997, pp. 53-59.
- Robinson, S.: General concepts of quality for discrete-event simulation. *European Journal of Operational Research* 138 (2002) 1, pp. 103-117.
- Robinson, S.: *Simulation: the practice of model development and use*. Palgrave Macmillan 2014.
- Rowe, W.D.: Understanding uncertainty. *Risk analysis* 14 (1994) 5, pp. 743-750.
- Voss, C.; Tsikriktsis, N.; Frohlich, M.: Case research in operations management. *International Journal of Operations & Production Management* 22 (2002) 2, pp. 195-219.
- Wynn, D.C.; Grebici, K.; Clarkson, P.J.: Modelling the evolution of uncertainty levels during design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 5 (2011) 3, pp. 187.
- Yin, R.K.: *Case Study Research: Design and Methods*. Thousand Oaks, CA: SAGE 2013.

Durchgehende Modellerstellung zwischen Simulations-, Visualisierungs- und Konstruktionswerkzeugen für die gesamtheitliche Planung von Produktions- und Intralogistiksystemen

Continuous Modelling between Simulation, Visualization and Construction Tools for the Holistic Planning of Production and Intralogistics Systems

David Weigert, Paul Aurich, Tobias Reggelin,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg (Germany),
david.weigert@ovgu.de, paul.aurich@ovgu.de, tobias.reggelin@ovgu.de

Abstract: The automated and semi-automated generation of material flow simulation models is discussed and developed for decades. With AutomationML (AML) a new, open, object-oriented, XML-based storage and exchange format is given, which in addition will allow an exchange between visualization, construction and simulation tools. The application of AML within the different tools intends to promote a consistent design within the product and production creation process of production and intralogistics systems. The focus of the ongoing implementation phase is in the data exchange from the visualization tool for construction and simulation tool. First prototype implementations outline the benefits but also the limits of the automatic model generation via AML. Up to now simple conveyor systems from straight, curved conveyor belts, rotary tables and single stations from the visualization tool Tarakos – taraVR can automatically be modelled in the simulation tool Siemens – Plant Simulation and construction tool Autodesk – AutoCAD. This eliminates the use of expensive and optional interface libraries.

1 Einleitung und Problemstellung

Aufgrund der immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen nimmt die Vielseitigkeit, Schnelligkeit und Flexibilität der Produktentstehung stetig zu. Diese Entwicklungen haben direkten Einfluss auf die mitwirkenden Logistik- und Produktionsprozesse (Schenk 2014). Die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung beschleunigt die Entwicklung der Durchgängigkeit verfügbarer Datenmodelle für die digitale Produktion und Logistik. Die Verwendung digitaler Werkzeuge aus den Bereichen Simulation, Visualisierung und Konstruktion erhöhen die Qualität der Planung, steigern die Effizienz und verkürzen die Produktentwicklung und

Markteinführung (Schenk 2014; Daft 2016; Klepper 1996; Lüder und Schmidt 2015). Diese Vorteile können nur dann vollständig ausgenutzt werden, wenn es ermöglicht wird, alle relevanten und bislang isolierten digitalen Methoden und Werkzeuge in ein integriertes Planungssystem zu überführen (Schreiber und Zimmermann 2011). Derzeit eingesetzte Werkzeuge decken nur bestimmte Funktionsbereiche innerhalb des Product Lifecycle Management (PLM) ab. Diese Konzentration auf einzelne Anwendungsbereiche des PLM ermöglicht eine hohe Spezialisierung der Werkzeuge. Hierdurch werden begrenzte Lösungsräume durch eine fehlende Schnittstellenintegration geschaffen. Ein Austausch von Planungsdaten in einer heterogenen Systemumgebung ist demnach nur begrenzt möglich (Faltinski et al. 2012; Rawolle et al. 2002). Im praktischen Einsatz besteht daher kein neutraler und IT-gestützter Ansatz für die durchgängige digitale Planung und Steuerung von Intralogistiksystemen und Produktionsbereichen. Es fehlt ein neutrales Austauschformat für die durchgängige Verfügbarkeit und gegenseitige Verwendbarkeit von Simulationsdaten, geometrischen Konstruktionspunkten und Visualisierungselementen. Im weiteren Verlauf werden das Konzept und Werkzeug zur durchgehenden Modellerstellung am Beispiel der Datenaustauschrichtung Visualisierung zu Simulation und Visualisierung zu Konstruktion näher erläutert.

2 Motivation und Zielstellung

Eine durchgehende Modellerstellung zwischen Simulations-, Visualisierungs-, und Konstruktionswerkzeugen für die gesamtheitliche Planung von Produktions- und Intralogistiksystemen beschreibt die Verknüpfung der drei wichtigsten digitalen Werkzeuge. Sowohl das Expertenwissen im Umgang mit den Werkzeugen als auch die inhaltliche Komplexität der einzelnen Werkzeuge sind als sehr hoch einzustufen. Durch separate Querschnittsfunktionen und proprietäre Softwarelösungen der einzelnen Tools ist es schwierig, einen gemeinsamen Übergabepunkt zu definieren. Das vorgestellte Konzept und Werkzeug beschreibt die Entwicklung einer anwendungsorientierten und quelloffenen Middleware. Das Ziel ist die Entwicklung eines durchgehenden, digitalen Austauschsystems (Abb. 1).

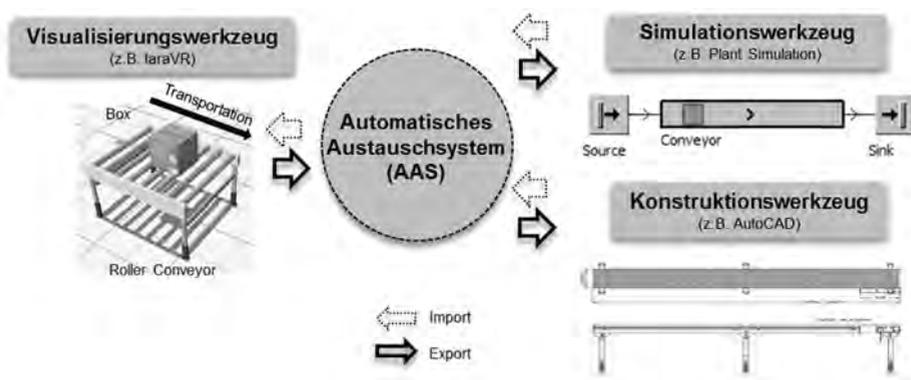


Abbildung 1: Konzeptdarstellung des durchgängigen Austauschsystems

Hierbei steht die verlustfreie und beschleunigte Konvertierung und Modellierung innerhalb der verschiedenen Werkzeuge im Fokus. Folgende Vorteile ergeben sich aus dem Einsatz von einem automatischen Austauschsystem:

- Bestehende Simulations-, Visualisierungs- und Konstruktionswerkzeuge bleiben im Unternehmen, eine kostenintensive Neuinvestition wird verhindert.
- Produktivität und Kostenreduktion können durch den Einsatz der Entwicklung erreicht werden, da die individuellen Vorteile der Werkzeuge kombiniert werden.

Die Visualisierung, Modellierung und Simulation von realen intralogistischen Systemen werden beschleunigt, da der überwiegend manuelle und kostenintensive Aufwand bei einer erneuten Modellerstellung reduziert wird. Weiterführend werden das Konzept und Werkzeug für die durchgehende und ganzheitliche Modellerstellung am Beispiel von dem Simulationswerkzeug Plant Simulation - Tecnomatix, und dem Konstruktionswerkzeug AutoCAD - Autodesk aufgezeigt. Das Visualisierungswerkzeug taraVR - Tarakos dient hierbei als Ausgangslage für die getätigten Untersuchungen.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Standardisierung von Systemen, Prozessen und deren Komponenten ist ein wesentliches Element in der Beherrschung von Komplexität sowie Kontrolle und Gestaltung von zukünftigen, digitalen Herausforderungen (Drath 2010; Eigner und Stelzer 2009). Lag der bisherige Fokus der kombinierten Planungsphasen auf einer Verkürzung im Time-to-Market von Produkten durch die Integration von Produkt-, Prozess- und Produktionssystemplanung, besteht der heutige Anspruch darin, frühzeitig belastbare Daten aus der Produktentstehung für die integrierte Fabrikssystementwicklung und -gestaltung zu nutzen (Schenk 2014; Schenk und Schumann 2008). Die Idee von kombinierten Planungsphasen ist bereits seit Jahren durch moderne und leistungsfähige Werkzeuge beschrieben (Dangelmaier 2013). Es existiert hierbei eine Vielzahl an Spezialfällen. Diese Spezialfälle bestehen aus individuell ausgearbeiteten Lösungen und sind für konkrete Problemstellungen ausreichend. Es fehlt der gesamtheitliche Planungsansatz, um eine Integration aller beteiligten Prozesse voranzutreiben. Erste Ansätze zur Generierung von layout-basierten Modellen finden sich bei Lorenz und Schulze (1995). Splanemann et al. (1995) beschreiben einen Ansatz, um sowohl strukturelle als auch Daten aus einem Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS) zu nutzen. Eine erste Klassifizierung von automatischen Modellgenerierungsansätzen stellt Eckardt (2002) bereit. Der Autor unterscheidet zwischen parametrischen, strukturellen und hybriden Ansätzen. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Klassifizierung von Ansätzen der Modellgenerierung bilden die Klassifikationsmöglichkeiten von Modellgenerierungsansätzen nach Straßburger et al. (2010). Bestrebungen zur durchgehenden digitalen Planung und Steuerung werden mit der Enterprise Application Integration (EAI) und den serviceorientierten Architekturen (SOA) realisiert (Aier 2006; Bieberstein 2008; Kaib 2004). Die EAI stellt integrierte Geschäftsprozesse entlang der Wertschöpfungskette dar. Unternehmensanwendungen verschiedener Generationen und Systemarchitekturen können hierbei über ein gemeinsames Netzwerk interagieren. Die SOA beschreibt eine Methode, die vorhandene IT-Komponenten abkapselt und koordiniert. Hierdurch werden bestehende Dienste konsolidiert und zu einem höheren Dienst zusammengefasst.

Die Ziele von EAI als auch SOA sind langfristig die Senkung der Kosten bei der Entwicklung von Produktionsprozessen und die Steigerung der Flexibilität der Geschäftsprozesse. Grund für die geringe Akzeptanz und Weiterentwicklung der Methoden sind hohe Anforderungen an Datensicherheit und Kontinuität der Werkzeugentwicklung sowie unsichere Systeme und Produktentwicklungsprozesse (Fay 2006; Raupricht et al. 2002). Das Zusammenwirken verschiedener digitaler Planungswerkzeuge innerhalb des Produktlebenszyklus wird oftmals auch unter dem Begriff „Digitale Fabrik“ zusammengefasst (VDI 2008; Wenzel et al. 2003). Auch hier findet sich eine Verknüpfung von unterschiedlichen Planungswerkzeugen. Jedoch fehlt der Einsatz von durchgehenden Planungstools.

3.1 Speicher- und Austauschformat

Die teil- und vollautomatisierte Modellgenerierung kann auch als datengetriebene Modellgenerierung bezeichnet werden (Bergmann 2014). Hierbei ist die Herkunft und Art der Daten und Informationen von höchster Bedeutung. Die zurzeit bekanntesten Standards zur automatischen Modellgenerierung sind die Datenformate Simulation Data Exchange Format (SDX) (Sly und Moorthy 2001) sowie Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) (Bergmann et al. 2010; Lee 2015). Das hierarchisch strukturierte SDX-Format dient ausschließlich der Bereitstellung von Layoutinformationen. Mit dem quelloffenen, XML-basierten CMSD-Format können sowohl layout- als auch prozessbezogene Informationen übermittelt werden. Die Problemstellung einer Implementierung von umfangreichen Steuerungs- und Routingstrategien und das komplexe Systemverhalten sind jedoch auch mit diesen Datenformaten nicht vollständig lösbar (Bergmann 2014; Bergmann et al. 2010). Durch AML ist ein quelloffenes, objektorientiertes, XML-basiertes Speicher- und Austauschformat entwickelt worden. AML besitzt die technischen Voraussetzungen für die Modellierung von Produktions-, Intralogistik- und Robotersysteme. Grundlegend arbeitet AML mit einer Verknüpfung von Rollenprofilen (Hoernicke et al. 2016; Hundt et al. 2009; Lüder und Schmidt 2015). Bisher können mit AML Topologie, Geometrie, Kinematik und das Verhalten von Systemkomponenten beschrieben werden. Die hierarchische Abbildung der Topologie eines Planungsgegenstandes erfolgt mittels Computer Aided Engineering Exchange (CAEX). Geometrie und Kinematik können durch Collada-Dateien einzelnen Systemkomponenten zugeordnet werden. AML ist anpassbar und flexibel gestaltet, es bietet die Möglichkeit weitere XML-Formate einzubinden (Hundt et al. 2009). Darüber hinaus besitzt das AML-Format eine inhärente verteilte Datenstruktur. Die Informationen werden statt in einem monolithischen XML-Dokument als Einzeldokumente gespeichert. Die Wiederverwendbarkeit einzelner Systemkomponenten und der Aufbau von Element-Bibliotheken werden somit erleichtert (Lüder und Schmidt 2015).

4 Automatisches Austauschsystem

Das automatische Austauschsystem (AAS) bildet die Basis für den gemeinsamen Daten- und Informationsaustausch. Das AAS wird durch ein System von Abbildungsregeln und einem dazugehörigen Benutzerinterface definiert. Innerhalb des Austauschsystems wird das zu übertragende Modellelement mit bestehenden oder neuen Rollenprofilen aus der hierfür entwickelten AutomationML-Rollenbibliothek belegt.

Neben der Übertragung von Modellelementen ist es von Bedeutung, deren Attribute wie Lage, Transportrichtung, Geschwindigkeit und weitere Zustandsbeschreibungen zu übernehmen. Des Weiteren müssen die Beziehungen zwischen den Elementen übertragen werden. Ziel ist es, eine unabhängige Modellerstellung über geschlossene Softwarepakete hinweg zu realisieren. Basierend auf der Klassifikationsmöglichkeit von Modellgenerierungsansätzen nach Straßburger et al. (2010) kann die dargestellte Entwicklung folgendermaßen eingeordnet werden:

- Einsatzfall: planungsbegleitend (taktisch)
- Fokussiertes Gewerke: Fördertechnik
- Grad der Automatisierung: teilautomatisch
- Ansatz: direkter generischer Aufbau
- Unterstützung bei Modellerstellung
- Schnittstelle: text- und XML-basiert

Bevor Modelle automatisch generiert werden können, ist es notwendig die Bausteine und Elemente der unterschiedlichen Werkzeuge aufeinander zu mappen. Das Datenmapping beschreibt den Prozess der Abbildung von Datenelementen zwischen unterschiedlichen Datenmodellen (Bogdan et al. 2008). Um dieses Datenmapping zu ermöglichen, wird ein sogenannter Regelinterpreter entworfen. Aus den jeweiligen Visualisierungs-, Konstruktions- und Simulationswerkzeugen (VKS-Werkzeugen) werden die Bibliotheken mit sämtlichen Bausteinen und deren Parametern exportiert und gemappt. Auf diese Art und Weise werden Regeln für die Übertragung definiert.

4.1 Automatisierte Modellgenerierung Simulationswerkzeug

Für das Simulationswerkzeug wird Plant Simulation der Firma Tecnomatix ausgewählt. Plant Simulation verfügt über eine Vielzahl von Lizenzarten und kostenpflichtigen Bibliotheken. Kostenintensive Lizenzarten wie „Professional“ in Kombination mit dem „Interface Package“ werden für die Entwicklung einer gemeinsamen Datenschnittstelle vermieden, da sie das Hauptziel einer quelloffenen und kostenneutralen Kommunikationsschnittstelle nicht erfüllen. Die Lizenzart „Standard“ bildet die Grundlage für die Schnittstelle. Ein Vorteil ist die Aufwärtskompatibilität der einfachen Datenstruktur (.txt-Datei). Ein Nachteil ist die aufwendigere Datenaufbereitung im AAS vor dem Im- und Export in das Simulationswerkzeug. Die Zeichenfolgen müssen einer vorgegebenen Form entsprechen, um exakt codiert und dechiffriert werden zu können. Die ermittelte Minimalanforderung für die geforderten Parameter aus dem Simulationswerkzeug für die Kommunikation mit dem Austauschsystem beinhalten:

- Objektinformationen: Name, Objektart, Geometrie
- Layoutinformationen: Lage und Verbindung zu anderen Elementen
- Materialflussparameter: Zeitverbrauch, Routing

Ein Direktimport von AML-Dateien in das Simulationswerkzeug wird nicht unterstützt. Für das Simulationswerkzeug wird daher eine Schnittstelle entwickelt (s. Alg. 1). Dieser steuert die Identifizierung der Objekte aus der Visualisierung und die Implementierung in das Simulationswerkzeug. Die Grundlage bildet eine Textdatei aus dem vorhergehenden Datenmapping.

Algorithmus 1: Pseudocode für Modellgenerierung I – Simulationswerkzeug

```

open textfile
while not textfile.end
read bibliothek, objecttyp, x-pos., y-pos., name
create object from bibliothek.objecttyp at x-pos.,y-pos.
  if next textfile.line ≠ trennzeichen
  do
  read parameter and parameter.value
  case parameter of
  case "input-id"
  if object.exists(input-id)
  connet object with input-object
  end if
  case "output-id"
  if object.exists(output-id)
  connet object with output-object
  end if
  else
  set object.parameter = parameter.value
  end case
  until next textfile.line ≠ trennzeichen
  end if
endwhile
close textfile

```

Das AAS für die Kopplung zwischen Simulation und Visualisierung arbeitet nach einer hierarchischen Verwaltung des Zugriffs auf eine gemeinsame Ressource als Master/Slave-System. Die Masterdatei, ein geschlossenes Simulationsprojekt, enthält alle benötigten Methoden zur Modellerstellung, zum Modellexport, zum Bibliotheks-export sowie zum Import der Bausteine. Die Datei kann selbst nicht geändert werden, lediglich das davon erstellte Abbild.

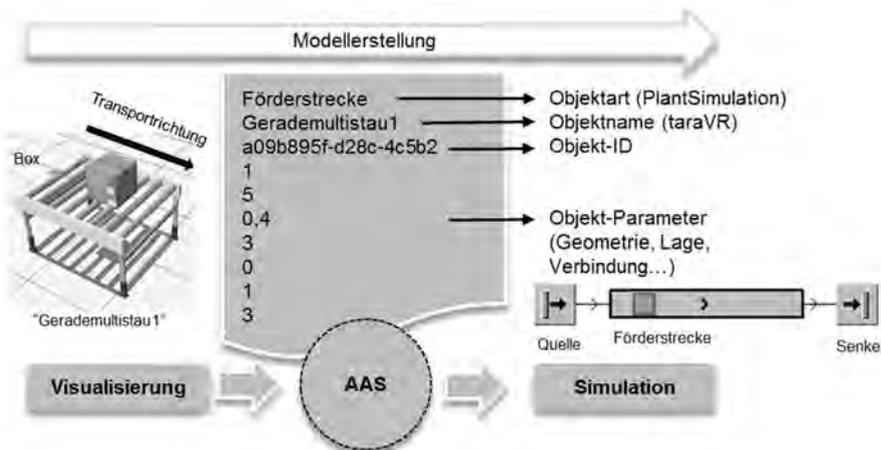


Abbildung 2: Beispiel der Modellerstellung – Visualisierung zur Simulation

Für jeden bisher gemappten Baustein wird ein neuer Quellcodeabschnitt erzeugt. Dies führt langfristig dazu, dass selbst individuelle Bausteinkästen der Endanwender ausgelesen und dynamisch angesprochen werden können. Die Abbildung 2 verdeutlicht die praktische Umsetzung und ergänzt den Pseudocode für die Modellgenerierung im Simulationswerkzeug. Nach der Generierung einer Textdatei aus den Visualisierungsdaten wird das Objekt im Master des Simulationswerkzeuges erzeugt. Hierzu ist es notwendig im vorherigen Schritt die bestehenden Bibliotheken aus dem Simulationswerkzeug auszulesen. Dies ist notwendig um das Objekt der Visualisierung als korrektes Objekt in der Simulation abzubilden. Dies passiert ebenfalls durch das AAS. Das AAS ist als ganzheitliche Middleware zu verstehen. Neben der automatisierten Modellerzeugung in das Simulationswerkzeug wird darin auch die Umsetzung in das Konstruktionswerkzeug verarbeitet.

4.2 Automatisierte Modellgenerierung durch das Konstruktionswerkzeug

AutoCAD der Firma Autodesk besitzt deutlich mehr Modifikationsmöglichkeiten im Bereich der Schnittstellenerstellung. Durch den Import von anderen CAD-Tools u. a. mit den Formaten aus 3D Studio, Autodesk Inventor und SolidWorks ist eine breite Basis für den Import vorhanden. Für die Entwicklung zum AAS ist die Vielzahl jedoch nicht von Bedeutung.

Die Grundlage der Entwicklung bildet das neutrale Austauschformat AML. Hierfür werden eigenständige Befehle für Import und Export entwickelt. Das Ziel der Durchgängigkeit zum Visualisierungswerkzeug wird dadurch sichergestellt, dass die Schnittstelle im Format *.net programmiert und verwendet wird.

Die ermittelte Minimalanforderung für die geforderten Parameter aus dem Konstruktionswerkzeug für die Kommunikation mit dem Austauschsystem beinhaltet:

- Objektinformationen: Name, Geometrie
- Layoutinformationen: Lage (Verbindungen sind nicht notwendig)
- Detailinformation zur Geometrie werden nicht benötigt, können jedoch optional in einer AML-Datei durch das Collada-Format angefügt werden.

Ein Direktimport von AML-Dateien wird durch die Autodesk Softwaresuite nicht unterstützt. Eine eigenständige Schnittstellenumgebung wird daher programmiert.

Algorithmus 2: Pseudocode für Modellgenerierung I – Konstruktionswerkzeug

```
define fcn = rootnode.childnodes and scn = FCN.childnodes
open xmlfile
while rootnode has fcn
  read SCN.objecttyp, SCN.x-pos, SCN.y-pos
  create object from blocktable.objecttyp at x-pos.,y-pos.
  if object is dynamic
    for i = 1 to SCN.parameter.count
      read SCN.parameter(i) and parameter(i).value
      set object.parameter(i)=parameter(i).value
    next
  end if
end while
close xmlfile
```

Innerhalb des Werkzeuges werden nicht nur statische Blöcke angesprochen. Die Blöcke sind vom Nutzer vordefinierte, zweidimensionale Körper. Sie werden in einer Blocktabelle gespeichert. Hiermit wird das Ziel verfolgt, eine dynamisierte Anpassung der Körper innerhalb vom Konstruktionswerkzeug zu erhalten. Eine statische 1:1-Beziehung von Objekten aus unterschiedlichen Werkzeugen entfällt (s. Alg. 2). Um Blöcke dynamisch erstellen und parametrisieren zu können, wird die Schnittstelle in C#.NET programmiert und in eine dll-Datei (Dynamic Link Library) gekapselt. Die gekapselte Programmumgebung wird als AAS.dll geführt und im Konstruktionswerkzeug aufgerufen. Am Beispiel (Abb. 3) wird die praktische Anwendung der Modellerstellung zwischen Visualisierungs- und Konstruktionswerkzeug deutlich. Der XML-Code beschreibt den in der Visualisierung abgebildete Rollenförderer. Der Code wird über die in AutoCAD aufgerufene dll-Datei ausgelesen und im Zielwerkzeug generiert. Innerhalb der Konstruktionsumgebung wird dieser Rollenförderer als dynamischer Block interpretiert. Bei Bedarf kann eine Anpassung des 2D-Layouts vorgenommen werden.

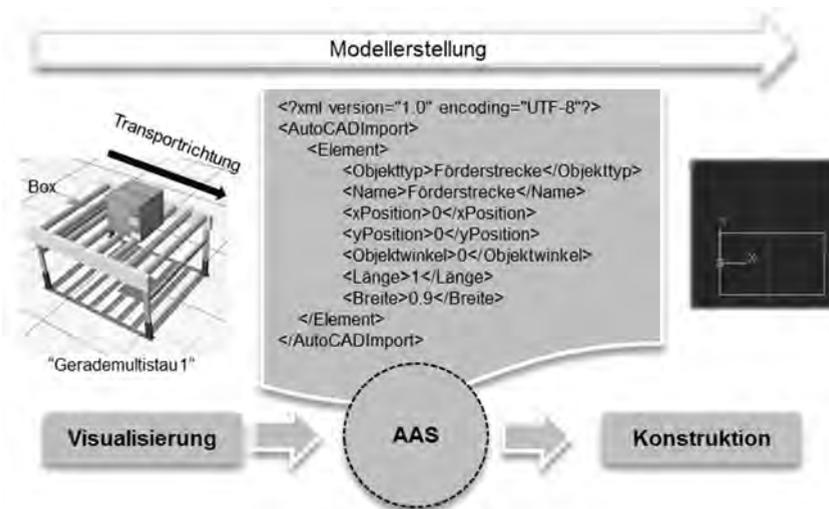


Abbildung 3: Beispiel der Modellerstellung – Visualisierung zur Konstruktion

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das beschriebene Konzept und Werkzeug stellt einen umfassenden Ansatz für die automatische und quelloffene Modellerstellung und Datenübertragung zwischen unterschiedlichen Werkzeugen dar. Damit ist eine Möglichkeit geschaffen, individuelle AML-Bibliotheken für Simulation, Visualisierung und Konstruktion einer wiederholten Nutzung zuzuführen. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Umsetzung erfolgreich möglich ist. Ebenso kommen hierbei keine proprietären Softwarelösungen zum Einsatz. Mit der Möglichkeit, die Modellerstellung innerhalb der unterschiedlichen Werkzeuge zu vereinen, kann es in Zukunft möglich sein, genaue und schnelle Modelle aus einer Hand zu produzieren. Dadurch wird eine kostspielige, fehleranfällige und zeitintensive mehrmalige Modellerstellung schon jetzt vermieden. Der erreichte Entwicklungsstand bildet die Grundlage für die Übertragung der

Modelle in das entsprechende Zielwerkzeug, beschrieben durch Simulation und Konstruktion. Weitere Schritte sind die Detaillierung und Standardisierung des automatisierten Austauschsystems. Die Zusammenarbeit mit Endanwendern aus der Praxis macht deutlich, welche weiteren Anforderungen an Funktionsumfang und Wirkungsweise das AAS zukünftig aufweisen muss. Hierbei sollen auch die Frage nach der Implementierung und Übermittlung der Arbeitspläne und die damit einhergehende Steuerung und das Routing der Elemente im Simulationswerkzeug erforscht werden. Die Rückführung der Informationen und Modelle aus dem Simulations- und Konstruktionswerkzeug in das Visualisierungswerkzeug werden zum aktuellen Zeitpunkt manuell im AAS vorgenommen. Ziel ist es, die Daten aus der Konstruktion durch ein erneutes Datenmapping im AAS zu verarbeiten. Für die Simulation ist die Einbindung des durch die Simulationsläufe erhaltenen Ereignisprotokolls angedacht. Die beschriebenen und geplanten Umfänge und Vorgehensweisen gilt es zukünftig zu vereinfachen und dynamischer zu gestalten. Gleichzeitig ist eine deutliche Steigerung der Benutzerfreundlichkeit im Umgang mit dem Tool eingepplant.

Literatur

- Aier, S. (Hrsg.): Enterprise application integration: Serviceorientierung und nachhaltige Architekturen. Berlin: GITO-Verlag 2006.
- Bogdan, A.; Chiticariu, L.; Miller, R.J.; Tan, W.-C.: Muse: Mapping Understanding and deSign by Example. In: IEEE: IEEE 24th International Conference on Data Engineering, Cancun, Mexico. New York: IEEE 2008, S. 10-19.
- Bergmann, S.: Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen. Ilmenau: Univ.-Verl. 2014.
- Bergmann, S.; Fiedler, A.; Straßburger, S.: Generierung und Integration von Simulationsmodellen unter Verwendung des Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Information Model. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 461-468.
- Bieberstein, N.: Executing SOA: A practical guide for the service-oriented architect. Upper Saddle River, NJ: IBM Press/Pearson plc 2008.
- Daft, R.L.: Organization theory & design. Boston, MA: Cengage Learning 2016.
- Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung: Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung; Grundlagen, Algorithmen und Beispiele. Berlin [u. a.]: Springer 2013.
- Drath, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML: Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin: Springer 2010.
- Eckardt, F.: Ein Beitrag zu Theorie und Praxis datengetriebener Modellgeneratoren zur Simulation von Produktionssystemen. Aachen: Shaker 2002.
- Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- Faltinski, S.; Niggemann, O.; Moriz, N.; Mankowski, A.: AutomationML: From data exchange to system planning and simulation. In: IEEE: Industrial Technology (ICIT), Athen. New York: IEEE 2012 S. 378-383.
- Fay, A.: Reduzierung der Engineering-Kosten für Automatisierungssysteme. Industrie Management (22) (2006) 22, S. 29-32.
- Hoernicke, M.; Messinger, C.; Arroyo, E.; Fay, A.: Topologiemodelle in AutomationML. Atp-Edition: automatisierungstechnische Praxis; Organ der GMA (VDI-VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik) und der

- NAMUR (Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie) 58 (2016) 5/2, S. 28-41.
- Hundt, L.; Lüder, A.; Barth, H.: Anforderungen an das Engineering durch die Verwendung von mechatronischen Einheiten und AutomationML. SPS/IPC/DRIVES 2009, S. 341-349.
- Kaib, M.: Enterprise Application Integration: Grundlagen, Integrationsprodukte, Anwendungsbeispiele. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. 2004.
- Klepper, S.: Entry, exit, growth and innovation over the product life cycle. Estados Unidos: American Economic Review 1996.
- Lee, Y.-T.T.: A Journey in Standard Development: The Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Information Model. Journal of research of the National Institute of Standards and Technology 120 (2015), S. 270-279.
- Lorenz, P.; Schulze, T.: Layout based model generation. In: Lilegdon, W.R. (Hrsg.): Proceedings of the 27th Conference on Winter Simulation, Arlington, VA, USA. New York: IEEE 1995, S. 728-735.
- Lüder, A.; Schmidt, N.: AutomationML in a Nutshell. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0: Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 1-46.
- Rauprecht, G.; Haus, C.; Ahrens, W.: PLT-CAE-Integration in gewerkeübergreifendes Engineering und PlantMaintenance. atp – Automatisierungstechnische Praxis 44 (2002) 2, S. 50-62.
- Rawolle, J.; Ade, J.; Schumann, M.: XML als Integrationstechnologie bei Informationsanbietern im Internet. Wirtschaftsinformatik 44 (2002) 1, S. 19-28.
- Schenk, M.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige: Berlin, Heidelberg: Springer 2014.
- Schenk, M.; Schumann, M.: Interoperable Testumgebung für verteilte domänenübergreifende Anwendungen. In: Scholz-Reiter, B. (Hrsg.): Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt. Berlin: GITO-Verl. 2008, S. 155-169.
- Schreiber, W.; Zimmermann, P.: Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld: Das AVILUS-Projekt - Technologien und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer 2011.
- Sly, D.; Moorthy, S.: Simulation data exchange (SDX) implementation and use. In: Peters, B.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, Arlington, VA, (USA). New York: IEEE 2001, S. 1473-1477.
- Splanemann, R.; Roth, M.; Soravia, S.: Einsatz der Materialflußsimulation zur Planung, Analyse und Optimierung von verfahrenstechnischen Produktionsanlagen. Chemie Ingenieur Technik 67 (1995) 9, S. 1107-1108.
- 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 4499 Blatt 1: Digitale Fabrik: Grundlagen. Berlin: Beuth 2008.
- Wenzel, S.; Hellmann, A.; Jessen, U.: e-Services - a part of the "Digital Factory". In: Bley, H. (Hrsg.): Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes 2003, S. 199-203.

Simulativer Vergleich zentraler und dezentraler Steuerungen einer Getriebefertigung

Simulative Comparison of Central and Decentralized Controls of a Transmission Production

Nils Willeke, Benjamin Kuhrke, Felix Kuschicke, Opel Automobile GmbH,
Rüsselsheim (Germany), nils.willeke@opel.com, benjamin.kuhrke@opel.com,
felix.kuschicke@opel.com

Robert Scheffermann, flexis AG, Stuttgart (Germany),
robert.scheffermann@flexis.de

Eckart Uhlmann, TU Berlin, Berlin (Germany), eckart.uhlmann@iwf.tu-berlin.de

Abstract: This paper deals with the development of a simulation system for the evaluation of control algorithms in production systems. The simulation system is capable of performing both high-performance studies of control algorithms in different scenarios as well as studies of real-time interactions between a human and a control system. The outcome of the investigation on structural parameters depends strongly on the scenarios. The inherent advantage of centralised control is the planning scope and the ability to carry out setup operations ahead of schedule. A high number of set-up procedures combined with a low frequency of disturbances will lead to a better performance of centralised control.

1 Einführung

Die industrielle Produktion sieht sich in der heutigen Zeit mit mehreren Megatrends konfrontiert (Abele und Reinhart 2011). Die Globalisierung eröffnet auf der einen Seite neue Absatzmärkte, aber verstärkt auf der anderen Seite den Wettbewerb und erhöht zugleich den Kostendruck der einzelnen Unternehmen (Niehues 2016; Brackel 2009). Zusätzlich fordern Kunden individuellere Produkte zu geringeren Preisen, aber gleichzeitig eine hohe Qualität (Brackel 2009). Die Folge sind volatile Märkte, eine Verkürzung der Produktlebenszyklen sowie eine Zunahme der Variantenvielfalt (Nyhuis und Wiendahl 2009).

In einem Wirtschaftsstandort wie Deutschland, in dem die Produktion eine hohe Bedeutung genießt (Abele und Reinhart 2011), ist es dabei umso wichtiger, Produkte effizient zu fertigen. Als Grundvoraussetzung müssen die Unternehmen ihre eigenen Prozesse beherrschen und stetig mittels Prozessinnovationen verbessern (Scholz-Reiter und Höhns 2012).

Um der Dynamik des Marktes zu begegnen, müssen Unternehmen ihre Produktionssteuerung befähigen, jederzeit den Zustand der Fertigung erfassen, bewerten und gegebenenfalls Anpassungen einleiten zu können. Nach Scholz-Reiter und Höhns (2012, S. 294) haben die Informations- und Kommunikationssysteme eine „sprunghafte Entwicklung“ vollzogen und ermöglichen eine permanente Datenverfügbarkeit. Neben der Datentransparenz ist die Geschwindigkeit, in der die Daten erfasst und verarbeitet werden, ein wesentlicher Faktor um eine echtzeitfähige Produktionssteuerung umzusetzen (Schmidt et al. 2007).

Zunächst werden noch einmal die Arten von Steuerungsstrukturen vorgestellt. Es kann zwischen zentral-hierarchischen, dezentral-hierarchischen und dezentral-heterarchischen Steuerungsstrukturen unterschieden werden (Abb. 1 sowie Scholz-Reiter und Freitag 2007)

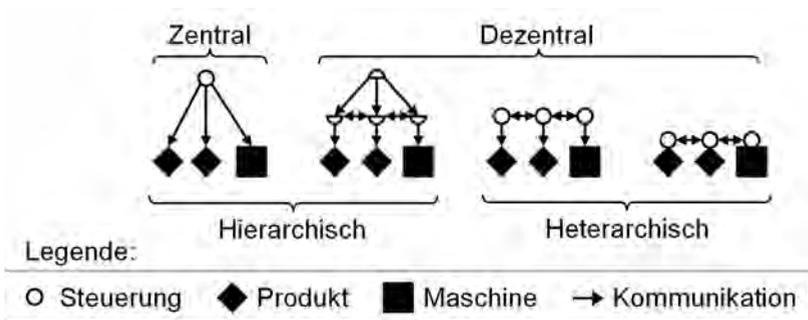


Abbildung 1: Klassifikation von Steuerungsstrukturen (Scholz-Reiter und Freitag 2007, S. 715)

Nach Lödding (2016, S. 2) sind die Voraussetzungen für eine effiziente Fertigung „ein realistischer und guter Produktionsplan“ und eine „funktionierende Fertigungssteuerung“. Fertigungssteuerungen, in denen Steuerungsentscheidungen anhand eines vorher festgelegten Produktionsplans getroffen werden, sind zentral-hierarchisch strukturiert. Diese Art wird in der Folge als *zentrale Steuerungen* bezeichnet. Sofern die Vorhersagequalität hoch bzw. die Auftragsschwankungen gering sind, lassen sich mit zentralen Steuerungen eine hohe Planungssicherheit und Planungsgenauigkeit erzielen (Grundstein et al. 2013; Schukraft et al. 2015). Auch wenn die beiden Attribute nur unter den beschriebenen Voraussetzungen gelten, sorgen sie für eine weite Verbreitung der zentralen Steuerung in der Praxis (Lödding 2016).

In turbulenten Fertigungsumgebungen stellt das Konzept der dynamischen Ablaufplanung (dynamic Scheduling) ein Lösungsansatz in zentral-hierarchischen Systemen dar. Bei Abweichungen vom Produktionsplan (z. B. infolge von Störungen) wird auf Basis des aktuellen Zustands eine Neuplanung (Rescheduling) angestoßen. Die neu berechnete Lösung wird entweder in den bisherigen Produktionsplan integriert oder ersetzt diesen. In dynamischen Umfeldern neigen Rescheduling-Ansätze zu einem Übersteuern, was als Systemnervosität bezeichnet wird und zu Instabilitäten führen kann (Ouelhadj und Petrovic 2008).

Dezentrale Ansätze in der Fertigungssteuerung zeichnen sich durch kurze Entscheidungswege und einen geringen Koordinationsaufwand aus (Schuh et al. 2012). Sie

sind dadurch sehr reaktionsschnell und flexibel einsetzbar (Ramsauer 1997). Mehrere Studien stützen die These, dass dezentral-heterarchische Entscheidungsstrukturen (nachfolgend als *dezentrale Steuerungen* bezeichnet) in komplexen und dynamischen Produktionsumfeldern ähnlich gute oder sogar bessere Ergebnisse als ausgewählte zentrale Steuerungsansätze erzielen können (Windt et al. 2010a; Windt et al. 2010b; Scholz-Reiter et al. 2010).

Die logistische Zielerreichung setzt sich aus Durchlaufzeit (DLZ), Auslastung und dem Work in Process (WIP) zusammen. Der entscheidende Einflussfaktor auf die logistische Zielerreichung von zentraler oder dezentraler Steuerung ist demnach die Komplexität eines Anwendungsszenarios (Philipp et al. 2006). Nach Schuh (2005) ist die Komplexität nur durch mehrere unabhängige Parameter zu beschreiben (Schuh 2005). Hierzu liefern Philipp et al. (2006) und Grundstein et al. (2015) eine Liste an möglichen Komplexitätstreibern.

Bei der Auslegung eines Komponentenwerks in der Automobilindustrie ist der zu erzielende Durchsatz vorgegeben. Das Maschinenmengengerüst sollte so aufgebaut werden, dass in Bezug auf die Maschinenkapazität ein Engpass am Anfang der Fertigung entsteht. Während der Fertigung wird die Maschinenkapazität durch deterministische (Rüst- und Werkzeugwechselfaufwände) und stochastische Ereignisse (Störungen) reduziert. Diese Einflüsse können durch die folgenden Parameter beschrieben werden:

- Rüstzeit,
- Werkzeugwechselzeit,
- Werkzeugstandmenge und
- Stördauer.

Die Werte der einzelnen Parameter können sich im Laufe der späteren Produktion durch kontinuierliche Verbesserungsprozesse verändern. Daher ist es unerlässlich, verschiedene Kombinationen möglicher Ausprägungsspektren der Parameter in Bezug auf die logistische Zielerreichung (Auslastung, DLZ und WIP) zu evaluieren. Eine Simulationsstudie mit einer zentralen und dezentralen Steuerung wird dabei Aufschluss darüber geben, ob die genannten Parameter die logistische Zielerreichung der beiden Steuerungen unterschiedlich stark beeinflussen.

Um die Fragen zu beantworten, wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, die in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben wird.

2 Simulationsumgebung

Im Rahmen des Forschungsprojektes iWePro wurde eine Simulationsumgebung entwickelt werden, welche in der Lage ist, einerseits hoch performante Simulationsstudien verschiedener Konstellationen aus Fertigungsstrukturen und Steuerungs-lösungen sowie andererseits Untersuchungen von menschlichen Steuerungseinflüssen, die über Smart Devices in Echtzeit getroffen werden, durchzuführen (Uhlmann et al. 2015; Otto und Uhlmann 2016). Erstere Untersuchung wird nachfolgend als *Simulator* bezeichnet und letztere als *hybrider Demonstrator*. Der hybride Demonstrator ist für die hier vorgestellten Ergebnisse zwar weniger relevant, sollte aber der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

2.1 Gesamtsystem und Kommunikation

Das Gesamtsystem koppelt diverse Software- und Hardwarekomponenten an den Simulator, welcher einmal im Umfeld des hybriden Demonstrators und einmal als Teil der Simulationsumgebung zur Durchführung von Simulationsexperimenten dient. Abbildung 2 zeigt die Zusammensetzung des Gesamtsystems:

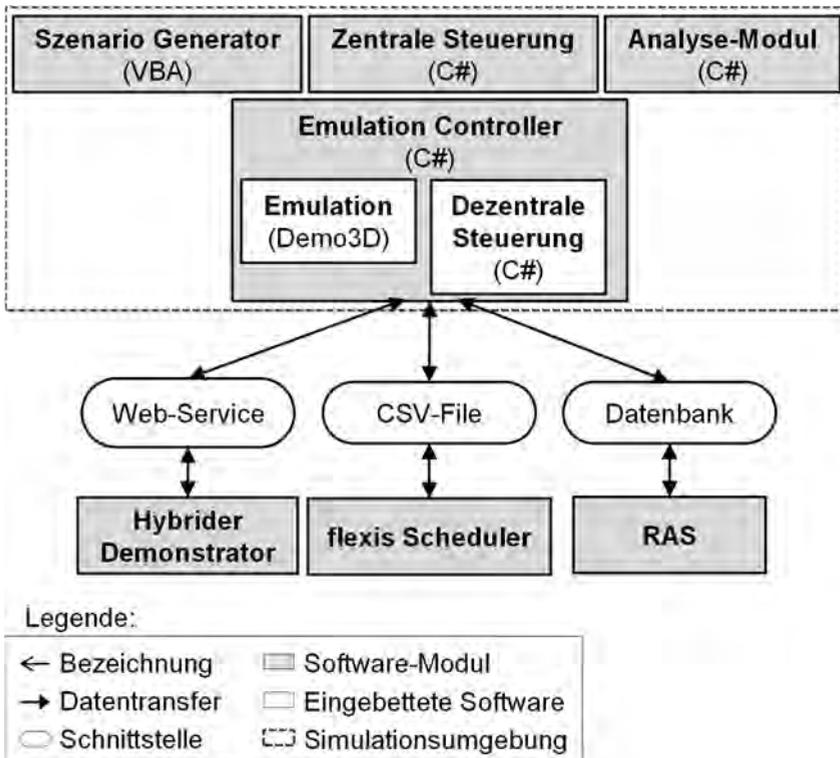


Abbildung 2: Einbettung des Simulators und des hybriden Demonstrators in das Gesamtsystem

Zur Demonstration des Gesamtsystems auf Messen wurde der hybride Demonstrator entwickelt. In diesem können Anwender interaktiv durch gekoppelte Hardware mit der Simulation interagieren (selbst Entscheidungen treffen). Darüber hinaus ermöglicht die 3D-Fähigkeit der Simulationssoftware Demo3D eine realitätsnahe Erprobung des Arbeitens in der Werkstattfertigung. Innerhalb des Forschungsprojektes iWePro wurde das System an diverse Komponenten gekoppelt, hierbei wurden unterschiedliche Kommunikationswege untersucht. Daraus resultierte u. a. eine Kommunikation über einen Web-Service, dessen Performanz die Geschwindigkeit des Simulators auf maximal 10-fache Echtzeit einschränkt.

Zur Bewertung der Lösungsqualität der simulatorinternen Steuerungsalgorithmen wurde eine Schnittstelle über CSV-Dateien zu dem Scheduler der flexis AG geschaffen, welcher mit mehr Rechenaufwand qualitativ hochwertige Lösungen generiert und

somit als Referenz dient. Der Einsatz dieses Schedulers für längere und/oder viele Simulationsläufe ist aufgrund der langen Rechenzeiten nicht praktikabel.

Das Fraunhofer IPK aus Berlin hat ein eigenes Rechner-Agenten-System (RAS) implementiert, welches alternativ die Simulation steuern kann. Die Schnittstelle zu diesem RAS wurde über eine Datenbank implementiert – die Performanz hierüber kann die Simulationsgeschwindigkeit bis zu dem 100-fachen der Echtzeit erreichen.

2.2 Simulator

Die Software-Architektur des Simulators und der direkt verbundenen Komponenten, welche für die Durchführung von Simulationsläufen relevant sind, wird in der Abbildung 3 dargestellt.

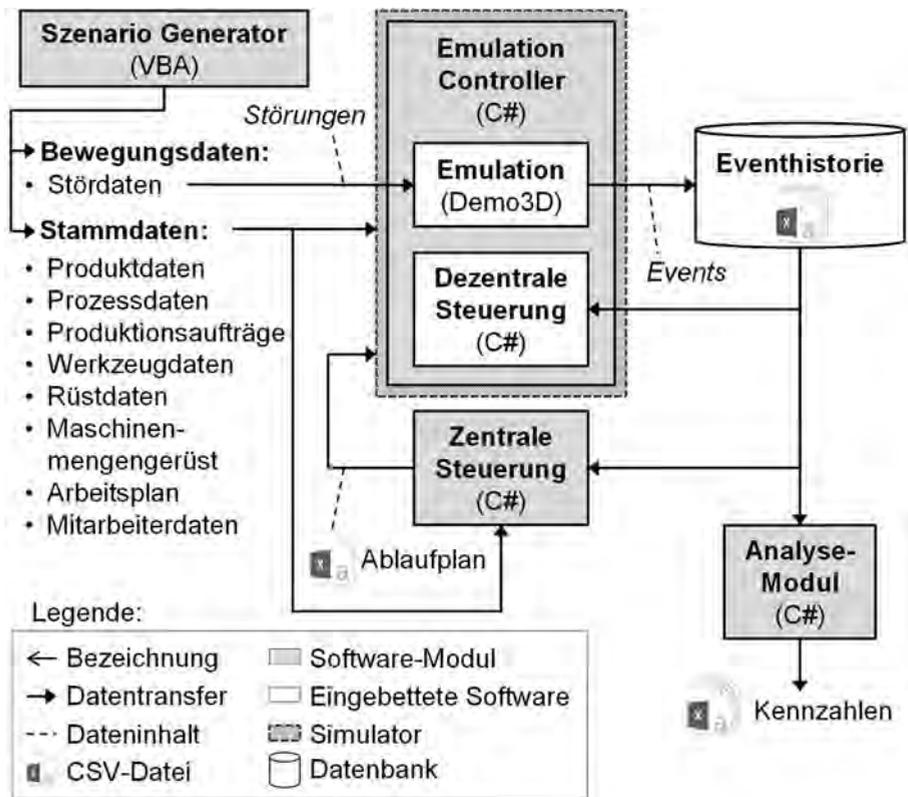


Abbildung 3: Software-Architektur für die Simulation

2.2.1 Emulation

Der Simulationskern enthält nur minimale Steuerungsintelligenz und führt primitive Befehle des Emulation Controllers aus. Es werden lediglich rudimentäre Restriktionen berücksichtigt (z. B. Anzahl freier Pufferplätze, Werkzeugstandmengen, Rüstrestriktionen). Die wesentliche Aufgabe des Simulationskerns besteht darin, die Befehle des Emulation-Controllers (insofern regelkonform) abzuarbeiten und zu den

unterschiedlichen Status der Prozesse entsprechend Events zu generieren und diese zu kommunizieren (Mitarbeiter-, Maschinen- und Auftragsstatus). Des Weiteren obliegt der Demo3D-Komponenten die Visualisierung des zu simulierenden Systems.

2.2.2 *Emulation-Controller*

Der Emulation-Controller (EC) ist innerhalb von Demo3D in C# implementiert und hat die Aufgabe der Steuerung des Gesamtsystems. Er gibt zu einem entsprechenden Zeitpunkt Befehle zur Auftragsbearbeitung an den Simulationskern und verfolgt über die Verarbeitung der Statusmeldungen (Events) aus diesem den Verlauf der Abarbeitung. Zu den Befehlen gehören

- der Transport von Korbstapeln zu den Bereichspuffern der Operationen,
- das Beladen einer dedizierten Fertigungszelle mit einem Korbstapel,
- das Entladen der Fertigungszelle,
- das Rüsten einer Fertigungszelle,
- den Werkzeugwechsel einer Fertigungszelle und
- die Behebung einer Störung an einer Fertigungszelle.

Neben der Steuerung der Simulation (man könnte hier auch von einer Emulation sprechen, da die Logik innerhalb des Demo3D-Moduls auf das reine Ausführen von Kommandos reduziert wird) bereitet der Emulation-Controller die Eventhistorie auf und generiert die Datenbasis zur Berechnung der Kennzahlen durch das Analyse-Modul (KPI-Manager). Hierfür werden die Statusmeldungen, die zu den entsprechenden Zeitpunkten der Abarbeitung generiert werden, konsolidiert und zu Zeitdauern und Typen zusammengefasst und exportiert.

Für die Steuerung der Simulation wird entweder eine dezentrale Steuerungslogik verwendet, die innerhalb des ECs implementiert ist und basierend auf dem aktuellen Zustand des Systems und einer einfachen Logik Entscheidungen trifft, oder es wird ein (in Visual Studio eigens für die Simulation entwickeltes) Software-Modul zur Ablaufplanung (Scheduling) gestartet.

2.2.3 *Dezentrale Steuerung*

Die dezentrale Steuerung wurde auf Basis eines in Scholz-Reiter et al. (2005) vorgestellten generischen Algorithmus realisiert, welcher in anderen Publikationen als Queue Length Estimator (QLE) bezeichnet wird (Scholz-Reiter et al. 2010; Windt et al. 2010a). Bei diesem wird vor jedem anstehenden Arbeitsgang und der damit verbundenen Entscheidung für eine geeignete Maschine, die jeweiligen aktuell möglichen Fertigstellungszeitpunkte aller zur Verfügung stehenden Maschinen berechnet. Um diese berechnen zu können, müssen alle sich in der Warteschlange vor einer Maschine befindlichen Arbeitsaufwände und die daraus resultierenden Rüst- und Werkzeugwechselfaufwände berechnet werden. Am Ende wählt das logistische Objekt die Maschine mit dem frühestmöglichen Fertigstellungstermin in dem betrachteten Arbeitsgang aus.

Die Auswahl des QLE wurde getroffen, weil sowohl innerhalb einer umfassenden Studie zum Vergleich von dezentralen Algorithmen in unterschiedlichen Anwendungsszenarien (Windt et al. 2010a) als auch in der Analyse von Studien zentraler Algorithmen in unterschiedlichen Anwendungsszenarien (Scholz-Reiter et al. 2010) vielversprechende Ergebnisse erzielt wurden.

2.2.4 Zentrale Steuerung

Zu Beginn eines jeden Simulationslaufs wird ein Schedule für einen definierten Zeitraum berechnet, welcher zusätzlich sowohl zyklisch als auch ereignisgesteuert aktualisiert wird (Rescheduling). Der Einsatz in einer Umgebung, die mit ca. 1.000-facher Echtzeit läuft, stellt besondere Anforderungen an die Performanz eines solchen Schedulers.

Der im Rahmen des Projektes iWePro entwickelte Scheduler beruht auf dem Prinzip des Beam-Search (Sabuncuoglu und Bayiz 1999). Dabei werden wie beim Dynamic-Programming sukzessive von einem Startzustand aus Nachfolgezustände erzeugt – je nach Anforderungen an die Laufzeit werden mehr oder weniger viele mögliche Zustände erzeugt bzw. es wird mehr oder weniger stark gefiltert. So kann die Laufzeit beliebig genau gesteuert werden.

Im Extremfall wird in jedem Schritt nur genau ein Nachfolgezustand erzeugt, die Entscheidung, welcher der möglichen Zustände gewählt wird, kann analog der Logik des Queue-Length-Estimators getroffen werden. Es entsteht quasi eine Queue-Length-Estimator-Depth-First-Search-Heuristik. Diese wurde innerhalb der Simulationsumgebung implementiert und erlaubt ein Rescheduling im zeitlichen Bereich von deutlich unter einer Sekunde.

3 Erkenntnisse

Viele umfangreiche Simulationsläufe bilden die Voraussetzung für statistisch fundierte Ergebnisse. Für einen vertretbaren Zeitaufwand eines Simulationslaufs ist die Performanz der Simulationsumgebung ausschlaggebend. Bei der Entwicklung der Simulationsumgebung wurden zwei wesentliche Erfolgsfaktoren zur Erreichung der nötigen Performanz identifiziert. Neben der reinen Simulation der Prozesse zeigen sich zwei wesentliche Aspekte für einen Mehraufwand an Rechenzeit (Overhead):

- Kommunikation mit externen Komponenten und
- das Rescheduling.

Die Kommunikation über Web-Services hat sich als sehr langsam erwiesen, sie drosselte die Geschwindigkeit des Gesamtsystems ca. auf ein 10-faches der Echtzeit. Dagegen erreichte die Kommunikation über eine Datenbank mit Triggern oder über CSV-Dateien Geschwindigkeiten von ca. 100-facher Echtzeit. Die Integration der dezentralen Steuerung und des initialen Schedulers als eigene Software-Module erlaubt aktuell eine Simulationsgeschwindigkeit mit ca. 1.000-facher Echtzeit.

Bezüglich des Scheduling hat der Rescheduling-Zyklus signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der zentralen Steuerung, sobald Störungen das System beeinträchtigen. Die Häufigkeit und Dauer des Rescheduling wirken sich direkt auf die Dauer eines Simulationslaufes aus (die Simulation wird während des Rescheduling gestoppt). Zusätzlich hat es sich als außerordentlich schwierig erwiesen, ein Full-Scale-Rescheduling zu integrieren, ohne die Laufzeit so stark zu reduzieren, dass die Simulationsumgebung noch sinnvoll nutzbar ist.

Dieses Problem kann an vielen Stellen angegangen werden: Zunächst sollte man einen Algorithmus wählen, der auch bei verkürzter Rechenzeit noch sehr gute Lösungen erzielt. Wenn der notwendige Rescheduling-Zyklus bekannt ist, sollte man den Zeithorizont des Scheduling einschränken und nur die naheliegende Zukunft planen.

Mit diesen zwei Maßnahmen kann die Rechenzeit akzeptabel kurzgehalten werden, aber es wird der Einsatz eines speziell für das Problem zugeschnittenen Algorithmus nötig.

4 Ausblick

Eine quantitative Analyse der Vor- und Nachteile einer zentralen bzw. dezentralen Steuerung sind allgemein nicht möglich, und eine umfassende Untersuchung steht noch aus. Es können aber grundsätzliche Erkenntnisse gewonnen werden, die hier zusammengefasst dargestellt werden.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass sich die Ergebnisse nicht stark unterscheiden, wenn eine Simulation mit stark deterministischem Umfeld und hoher Auslastung durchgeführt wird, was nicht verwundert, da beide Steuerungsarten die gleichen Entscheidungsmuster befolgen.

Die typische Auslegung in der Praxis sieht allerdings vor, in der ersten Bearbeitungsstufe einen Engpass zu installieren und in nachfolgenden Schritten „Puffer“ vorzusehen, welche „Lücken“ in der Bearbeitung zur Folge haben. Wenn diese Grundausslegung stark ausgeprägt ist, hat die zentrale Planung einen starken Vorteil. Durch den größeren Planungshorizont der zentralen Steuerung kann ein nötiges Rüsten innerhalb der Leerlaufzeiten vorgezogen werden kann (Belegungsplan ist schon vorhanden). Bei der dezentralen Planung erfolgt das Rüsten immer erst, wenn der Korbstapel sich an der Fertigungszelle „anmeldet“ bzw. zum Zeitpunkt der Steuerungsentscheidung – dies hat Einbußen bei der Durchlaufzeit der Aufträge bei der dezentralen Steuerung zur Folge.

Offensichtlich hat die dezentrale Steuerung einen Vorteil, je mehr und länger Störungen im System auftreten, und je seltener ein Rescheduling angestoßen wird. Dieser Effekt verstärkt sich durch zwei Faktoren: Je stärker das Gesamtsystem ausgelastet wird, desto länger dauert es, bis die Korrektur des Reschedulings greift. Zum anderen hat der Prozess einen Einfluss: Je früher eine irreversible Zuordnung eines Korbstapels zu einer Fertigungszelle getroffen wird (z. B. bei Verlassen des Bereichspuffers) und je größer die Puffer/Zeiten von dieser Entscheidung bis zur Bearbeitung sind (z. B. durch die Anzahl der Pufferplätze vor den Fertigungszellen oder die Integration einer automatisierten Beladezelle mit mehreren Stellplätzen), desto stärker hat eine „späte“ Entscheidung der Zuordnung eines Korbstapels zu einer Fertigungszelle einen positiven Einfluss auf die Vermeidung von starken Verspätungen, was eher einer dezentralen Steuerung zugutekommt.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass bei bisherigen Analysen die Komplexität des Gesamtsystems (heterogene Rüstzeiten, Werkzeugwechsel, Störgruppen) zu keinen deutlichen Unterschieden in der Leistungsfähigkeit von dezentralen bzw. zentralen Steuerungssystemen geführt hat.

Auf Basis dieser grundsätzlichen Erkenntnisse werden als nächste Schritte umfangreiche Simulationsläufe auf konkrete zu untersuchende Szenarios mit dem Ziel einer quantitativen Analyse durchgeführt, um für praktische Überlegungen zur Auslegung und Steuerung ähnlicher Systeme in der Praxis eine Hilfestellung zu bieten.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Verbundforschungsvorhabens iWePro „Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion“ im Rahmen der Fördermaßnahme „Intelligente Vernetzung in der Produktion – Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt Industrie 4.0“.

Literatur

- Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011.
- Brackel, T.v.: Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen. Wiesbaden: Gabler 2009.
- Grundstein, S.; Schukraft, S.; Görges, M.; Scholz-Reiter, B.: Interlinking central production planning with autonomous production control. In: Marascu-Klein, V. (Hrsg.): *Advances in Production, Automation and Transportation Systems*, 2013, S. 326-332.
- Grundstein, S.; Schukraft, S.; Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Evaluation system for autonomous control methods in coupled planning and control systems. In: Teti, R. (Hrsg.): *9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Red Hook, NY, USA: Curran, 2015, S. 121-126.
- Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016.
- Niehues, M.: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung. Technische Universität München, Dissertation 2016.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Fundamentals of production logistics: Theory, tools and applications. Berlin [u. a.]: Springer 2009.
- Otto, F.; Uhlmann, E.: iWePro – Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion. In: Krüger, J.; Uhlmann, E.; Verl, A.; Klemm, P.; Brecher, C. (Hrsg.): *Industrie 4.0*. Düsseldorf: VDI Verlag 2016, S. 71-85.
- Ouelhadj, D.; Petrovic, S.: A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of Scheduling* 12 (2008) 4, S. 417-431.
- Philipp, T.; Böse, F.; Windt, K.: Autonomously Controlled Processes – Characterisation of Complex Production Systems. In: Cunha, P.; Maropoulos, P. (Hrsg.): *Proceedings of 3rd CIRP Conference in Digital Enterprise Technology*, Setubal, Portugal, 2006, (ohne Seitenzahlen).
- Ramsauer, C.: Dezentrale PPS-Systeme: Neue Strukturen bei hoher Innovationsdynamik. Wiesbaden: Gabler 1997.
- Sabuncuoglu, I.; Bayiz, M.: Job shop scheduling with beam search. *European Journal of Operational Research* 118 (1999), S. 390-412.
- Schmidt, M.; Fronia, P.; Fisser, F.; Nyhuis, P.: Decentralized planning and control for assembly areas driven by Gentelligent® parts. In: Helander, M. (Hrsg.): *IEEM 2007*. [Piscataway, NJ]: IEEE 2007, S. 1088-1092.
- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous processes in assembly systems. *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 712-729.

- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; Beer, C. de; Jagalski, T.: Modelling and analysis of autonomous shop floor control. In: Proceedings of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Florianopolis, Brasilien, 2005, S. 1-6.
- Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.: Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 2. Berlin: Springer Vieweg 2012, S. 294-335.
- Scholz-Reiter, B.; Rekersbrink, H.; Görges, M.: Dynamic Flexible Flow Shop Problems - Scheduling Heuristics vs. Autonomous Control. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010) 1, S. 465-468.
- Schuh, G.: Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. München [u. a.]: Carl Hanser 2005.
- Schuh, G.; Brosze, T.; Meier, C.: Gestaltung der innerbetrieblichen Produktionsplanung und -steuerung. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Berlin: Springer Vieweg 2012, S. 297-305.
- Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS. Berlin: Springer Vieweg 2012.
- Schukraft, S.; Grundstein, S.; Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Evaluation approach for the identification of promising methods to couple central planning and autonomous control. International Journal of Computer Integrated Manufacturing (2015), S. 1-24.
- Uhlmann, E.; Schallock, B.; Otto, F.: Intelligente Werkstattfertigung. wt-online 105 (2015) 4, S. 184-189.
- Windt, K.; Becker, T.; Jeken, O.; Gelessus, A.: A classification pattern for autonomous control methods in logistics. Logistics Research 2 (2010a) 2, S. 109-120.
- Windt, K.; Philipp, T.; Böse, F.; Becker, T.: Application of the 3-component evaluation system for autonomous control in logistics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture (2010b) 224, S. 1267-1276.

Analysing the Influence of Hinterland Transportation Costs on Port Market Share: A Combined Discrete-Event and Agent-based Simulation Approach

***Analyse des Einflusses von Transportkosten im Hinterland auf den
Marktanteil von Häfen: Ein kombinierter ereignisdiskreter und
agentenbasierter Simulationsansatz***

Ralf Elbert, Jan Philipp Müller, Katrin Scharf, TU Darmstadt, Darmstadt
(Germany), elbert@log.tu-darmstadt.de, mueller@log.tu-darmstadt.de,
scharf@log.tu-darmstadt.de

Abstract: Well established hinterland connections play an even more important role in the competition of ports for market shares. In this relation changing transport costs in the hinterland can shift large transport volumes between ports. However a sophisticated estimation of port market shares in dependence of hinterland transport costs that consider the economic-geographic conditions in the hinterland (transport networks, geographical distribution of transport sources/sinks) along with the port choice behaviour of decision makers has not been conducted so far. The paper at hand provides such estimation by the means of a combined discrete-event and agent-based simulation study. The impact of changing rates for intermodal transport in the maritime export of containerized freight from south-west Germany towards the ports in the Hamburg – Le Havre range is analysed. The results show an inelastic transport demand towards the northern ports (Hamburg and Bremerhaven), revealing a possible scope for intermodal operators to increase their rates.

1 Introduction

Ocean container transport is the backbone of globalization and has shown sustainable growth over the last decades (World Bank 2017). The prospect of continuing increases in container traffic does not only lead to intense competition among ocean carriers. A fierce rivalry for market shares can also be observed between ports. Especially ports that are located in the same port range (like the Hamburg – Le Havre range) and therefore share the same hinterland face a so called intra-range competition for container transshipment volumes (Notteboom and de Langen 2015).

In this case shippers, ocean carriers and freight forwarders can choose between several ports for import or export cargo flows. The competitiveness of a port is determined by a broad range of factors that all together significantly influence the port choice (Song et al. 2016). Besides the seaside connectivity (among others number of available container liner services and frequency of port calls) and the infrastructure within the port (among others terminal operations) the hinterland connections are of high relevance as well (Steven and Corsi 2012). In this relation changing rates of the land carriers (intermodal rail/road freight operators or unimodal road freight carriers) can significantly influence the competitiveness of a port since 40 % to 80 % of the overall transport chain costs in containerized transport is caused by inland costs (Notteboom and Rodrigue 2009). Considering the high price elasticity in maritime transport even moderate changes in hinterland transportation costs can shift large freight volumes between competing ports (Song et al. 2016).

Due to its importance regarding port choice an accurate calculation to which extent freight volumes relocate to other ports in dependence of changing hinterland transportation costs can provide useful insights for all actors in the maritime transport process. Land freight carriers can determine the transport demand on their hinterland connections as function of their rates and can identify possibilities for revenue growth. Port authorities and terminal operators can evaluate the impact on transshipment volumes within the port. Finally ocean carriers can quantify the effect on loading and unloading volumes in a specific port and in consequence may decide to adapt the port calls in their service routes.

Despite the relevance of hinterland transportation costs existing research has either focused on identifying decisive criteria for selecting a specific port by the means of empirical surveys (see among others Yuen et al. 2012; Nugroho et al. 2016) or analysing price and capacity decisions of ports in intra-range competition by game theoretical models (see among others Ishii et al. 2013). Regarding the hinterland connections as one decisive part in port choice (besides seaside connectivity and port infrastructure) the empirical studies of the first research stream identify transport cost and transport time as the most prominent evaluation criteria (Nugroho et al. 2016). Consequently transport times should also be considered when analysing the impact of changing transport cost since the decision makers weight both criteria and lower transport times can compensate higher cost up to a certain level (Yuen et al. 2012).

In summary such empirical studies provide a deeper understanding of the decision behavior of the actors. However for analysing the impact of changing hinterland transportation costs on the market share of a port a more comprehensive approach is required that consider geographical distribution of freight demand and the existing transport networks in the hinterland additionally to the choice behavior of shippers, carriers and freight forwarders. When the locations of transport sinks/sources in the hinterland and the respective available transport options from/to the ports are known it is possible to calculate transport times and costs in the hinterland. Those can then be evaluated by the choice behavior models for determining the chosen ports.

Game theoretical models for price and capacity decisions are the second relevant research stream regarding port competition (Lee and Song 2017). The existing approaches focus on the strategic behavior of ports in intra-range competition

regarding price and capacity decisions in the ports. Due to the game theoretical approach the reactions of competing ports can be considered and market shares of the ports in the economic equilibrium can be determined. However these analytical models strongly simplify the economic-geographic conditions in the hinterland and the port choice behavior (Lee and Song 2017). They assume a uniform price for hinterland transport for each port and neglect the concrete locations of transport sources/sinks as well as the transport networks in the hinterland. Regarding choice behavior the transshipment volumes of the ports are determined by a simple cost equilibrium (Ishii et al. 2013). Therefore despite their importance regarding port choice transport times in the hinterland are not considered.

In summary the following research gap can be identified: The influence of changing hinterland transportation costs on the market share of competing ports has not been analysed so far by a comprehensive approach that considers the economic-geographic conditions of the hinterland (transport networks, geographical distribution of transport demand) and a port choice model that takes hinterland transport times into account, too. In consequence intermodal operators in the hinterland cannot estimate in how far their revenues could be increased by changing their rates. Furthermore port authorities as well as terminal operators and carriers operating in the ports cannot determine the robustness of market shares in the ports with regard to varying hinterland transport cost. However this evaluation is important for assessing the competitive position of the respective ports. The research goal of the paper at hand is therefore to determine how price sensitive decision makers react to changing hinterland costs and as a result to which amount market shares of the ports change. This question is answered for an exemplary case for the maritime export from south-west Germany (Baden-Württemberg, Hesse and Rhineland-Palatine) via the four largest ports in the Hamburg – Le Havre range (Antwerp, Bremerhaven, Hamburg and Rotterdam). The hinterland region is characterized by a high gross value added and high export quotas (Statistisches Bundesamt 2016; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2016). Due to the geographical location, the well-developed hinterland connections and a wide range of container liner services the four named ports find themselves in intra-range competition for the export volumes from this region (Notteboom and de Langen 2015). The analysis determines the market share for the ports in the three federal states as well as the modal split of intermodal rail/inland waterway transport and unimodal road transport in the hinterland by the means of a combined discrete-event and agent-based simulation study.

The remainder of the paper is organized as follows: Section two describes the simulation model and the conduction of the simulation experiments. In section three the results are presented. Finally a conclusion and outlook is given in section four of the paper.

2 Simulation

A combined discrete-event and agent-based simulation model is implemented in the software AnyLogic 8.0 as a leading tool for multi-method simulation (The AnyLogic Company 2017). The model can be structured in four modules as shown in Figure 1, together with the embedded GIS-map of the model and the visualization of hinterland transport to the ports by rail, barge and truck.

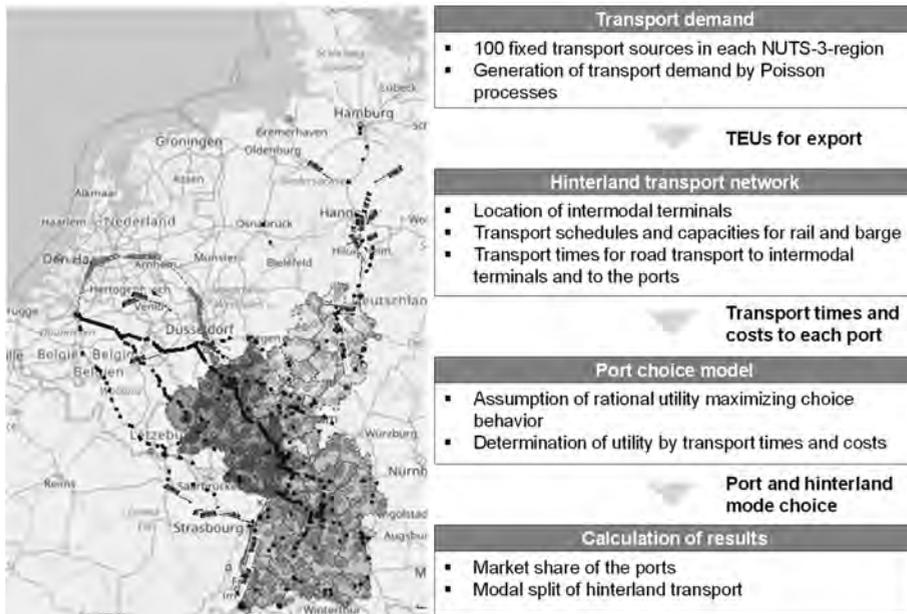


Figure 1: GIS map with visualization of the transport processes and modules of the simulation model

In the first module the transport demand is generated. The three federal states are further divided into their NUTS-3-regions (systematic of the European Union for territorial units; corresponds to districts and independent cities in Germany). For each NUTS-3-region the annual export volumes (in twenty-foot equivalent unit, TEU) is calculated based on statistical information for gross value added in the industry sector in each region (Statistisches Bundesamt 2016) and data for annual exported TEU from the North European Container Traffic Model (NECTM, ISL and Holocher 2015; ISL and HIS Global GmbH 2015). By assuming that the export volume is linear in gross value added the overall transport volumes (available in NECTM) are assigned to the NUTS-3-regions in each federal state. In the simulation model a Poisson process for each NUTS-3-region is defined (rate equals exported TEU per day for the region, assuming that the annual exported TEUS are distributed evenly over the year). The created TEU are located randomly within the region.

The second module represents the hinterland transport network. The locations of intermodal terminals are implemented into the GIS-map of the simulation model (data available at SGKV 2017). The transport times for road transport from all transport sources to the intermodal terminals and to the ports are calculated by a shortest path algorithm (constant travel times and a mean velocity of 50 km/h according to Kille and Schmidt (2008) are assumed). For each source all terminals with a road distance of maximum 100 km are considered as possible transshipment point for intermodal transport (according to Ye et al. 2014). The schedules of intermodal rail and inland waterway transport are stored in the model (data available at ECORYS Nederland BV 2017 and at the websites of respective intermodal operators). Uniform capacity limits for each transport unit are assumed (1 TEU for trucks, the capacity limits for trains and barges are part of the model calibration that

is described below). Regarding transport costs for road the marginal costs are set to 2.5 €/TEUkm (based on Reis 2014). For intermodal rail and inland waterway transport relation-specific rates are stored that were provided by an intermodal operator. Since the focus of the analysis is on the hinterland connections an equal seaside connectivity of the ports and equal port infrastructure is supposed so that those factors do not influence the port choice. They are therefore neglected in the model. In further model developments those criteria could be integrated. However for this first simulation neglecting the seaside and port infrastructure makes the impact of changing hinterland transport costs more transparent.

For the port choice a rational utility-maximizing decision behavior is assumed. The decision process is modelled as follows: for each created TEU all possible transport options to all four ports are evaluated regarding transport time and cost. Transport costs for road are calculated by road distance and fix marginal cost value. Transport costs for intermodal transport are the sum of road transport costs for pre-haulage to the terminal and the respective relation-specific rate (including transshipment costs and transport costs from terminal to port). The transport time is defined by the difference of date where the TEU is created to date where the TEU arrives in the port. For each transport option a utility value is calculated by adding transport costs and transport time. Transport time is weighted by the fix parameter value of time (VOT). This parameter represents the monetary value for the decision maker of a transport time reduction by one time unit. Finally the transport option with highest utility is chosen for the respective TEU.

A time range of four months is examined in each simulation experiment. In the module for result calculation the market shares of the ports are calculated for each federal state (defined as the share of arrived TEU in each port of all created TEU in the federal state) as well as the modal split in hinterland transport for each port (defined as share of arrived TEU by each transport mode). In the calibration process and following analysis the ports of Hamburg and Bremerhaven as well as Antwerp and Rotterdam are evaluated as pairs together. For an intermodal operator it should be less decisive if the containers are transported to Hamburg or Bremerhaven because the transport routes are very similar (most of the trains have one part for each port and are split in the shunting yard of Maschen). Therefore the relevant competition for intermodal operators is supposed to be between the northern and western ports.

The model was validated in an expert workshop with managers of an intermodal operator and a manager of a port authority from one of the considered ports. The port choice model was validated in expert interviews with decision makers of shippers, carriers and freight forwarders. Calibration is performed by minimizing the deviation of the values for market share and modal split compared to respective data from the NECTM. The calibration parameters are the VOT and capacity limits for trains and barges. The results of the calibration process are shown in Table 1.

The market share of the ports is reproduced with only small deviations. Since in the simulation other ports of the Hamburg – Le Havre range are neglected the market share of the four considered ports sum up to 100 % (the statistical data of NECTM also shows a negligible market share of other ports for Hesse, Baden-Württemberg and Rhineland-Palatine). Also the modal split for Antwerp and Rotterdam almost equals the statistical data. The modal split for rail transport towards Hamburg and

Bremerhaven is approximately 20 percentage-points too high (road transport is 20 percentage-points too low respectively). When comparing the simulation results to real data in general the simplified model assumptions should be taken into account. Furthermore the assumption of a rational utility-maximizing choice behavior does not necessarily represent real-world decision making processes with highest accuracy especially regarding transport mode choice. Elbert and Seikowsky (2017) show that biasing effects could imply an increased rigidity to modal shift from road transport to intermodal rail transport. One example is loss aversion (in form of fearing reduced transport quality) that is especially prevalent in small and medium sized companies. A further aspect that is not considered in the model is transport reliability. Because of a possible lower punctuality in rail transport in general decision makers might prefer road transport (Reis 2014).

Table 1: Resulting values from model calibration (reference data from NECTM in brackets)

Calibration parameters	Market share of ports	Modal split
	Hamburg and Bremerhaven	
<i>VOT:</i>	<i>Hesse:</i>	<i>Road:</i> 0.8 % (21.1 %)
4	52.4 % (55.6 %)	<i>Rail:</i> 99.2 % (78.8 %)
	<i>Baden-Württemberg:</i>	<i>Inland waterway:</i> 0 % (0 %)
<i>Train capacity:</i>	43.0 % (46.3 %)	
20 TEU	<i>Rhineland-Palatine:</i>	
	14.7 % (11.9 %)	
<i>Barge capacity:</i>	Antwerp and Rotterdam	
250 TEU	<i>Hesse:</i>	<i>Road:</i> 17.9 % (16.8 %)
	47.6 % (44.4 %)	<i>Rail:</i> 19.5 % (21.0 %)
	<i>Baden-Württemberg:</i>	<i>Inland waterway:</i> 62.6 % (61.6 %)
	57.0 % (53.7 %)	
	<i>Rhineland-Palatine:</i>	
	85.3 % (88.1 %)	

The impact of changing rail freight rates towards Hamburg and Bremerhaven is analysed by the means of parameter variation. The relation-specific rates are varied in the range of 30 % till 300 % of the provided rates of the intermodal operator. Rates for rail and inland waterway transport towards Antwerp and Rotterdam are left constant.

This scenario enables the analysis of several possible real-world developments. One cause of changing rates could be profit maximization of intermodal operators. When the offered train capacity is constant the operators will seek a revenue maximizing rate for their services. It can further be assumed that because of the substitutable nature of the transport services the rates of different operators for a specific relation are equal. Another reason could be that the rail infrastructure company (DB Netz AG) considers higher track access charges because of the high utilization of the rail links towards the German deep-sea ports (for covering higher maintenance costs or

financing punctual capacity expansions). Intermodal operators (and railway undertakings) may then decide to pass their increased costs to their customers.

With each rate-level a separate simulation run is conducted with fixed seed of the random number generator for ensuring reproducibility. The gained results are described in the next section. Considering the deviation of modal split towards Hamburg/Bremerhaven because of the explained model restrictions the analysis should be interpreted as a first estimation of general market trends. The results should illustrate the application of the simulation approach in market studies with regard to freight rates. For further practical applications the integration of the neglected influence factors (bounded-rationality choice, reliability of transport modes) into the model is a necessary prerequisite.

3 Results

The market share of Hamburg and Bremerhaven in the federal states and the overall revenue of the intermodal rail services towards the northern ports (relative to rate 100 %) in dependence of the changed rates are depicted in Figure 2. In the calibrated model with the provided rates by the intermodal operator (factor 100 %) the market shares in Hesse and Baden-Württemberg are substantially higher than in Rhineland-Palatine. The differences are caused by the geographical proximity of Rhineland-Palatine to Antwerp and Rotterdam and the high number of intermodal inland waterway connections from terminals in this federal state (53 % of the overall TEU of Rhineland-Palatine are transported by barge towards Antwerp and Rotterdam). In Baden-Württemberg the market share for Antwerp and Rotterdam is large along the Rhine corridor (75 % or higher). On the opposite for the region around Stuttgart, that also creates a high transport volume, more than 50 % of the containers are transported towards Hamburg and Bremerhaven. In Hesse the northern parts of the state show a market share of almost 100 % towards Hamburg and Bremerhaven. In the central and southern parts the transport volume is approximately divided equally among the ports.

Regarding changes in the rates the curves indicate a very inelastic demand in the range of 30 % till 130 % (for Baden-Württemberg and Rhineland-Palatine) or 180 %, respectively (for Hesse). As the results show a rate reduction (compared to the current rates of 100 %) will not generate additional transport demand towards the northern ports. The reason is a lack of free capacity on the rail connections. They are almost fully utilized at a rate of 100 %. In consequence additional revenues on the basis of a rate reduction can only be created by expanding capacity. However in this case the intermodal operators must also consider the costs for the additional capacity for identifying possible profit growths.

The almost constant market shares for growing rates up to 130 % or 180 % result on the one hand from geographical conditions. Accordingly some regions can be classified as dedicated for the northern or western ports (for example northern Hesse or western Rhineland-Palatine). On the other hand the amount of rail connections towards the northern ports is considerably higher than towards the western ports for most of the intermodal terminals. This better transport offer can be seen as relevant differentiation characteristic in the port competition which provides the scope for intermodal operators to increase their rates towards Hamburg and Bremerhaven.

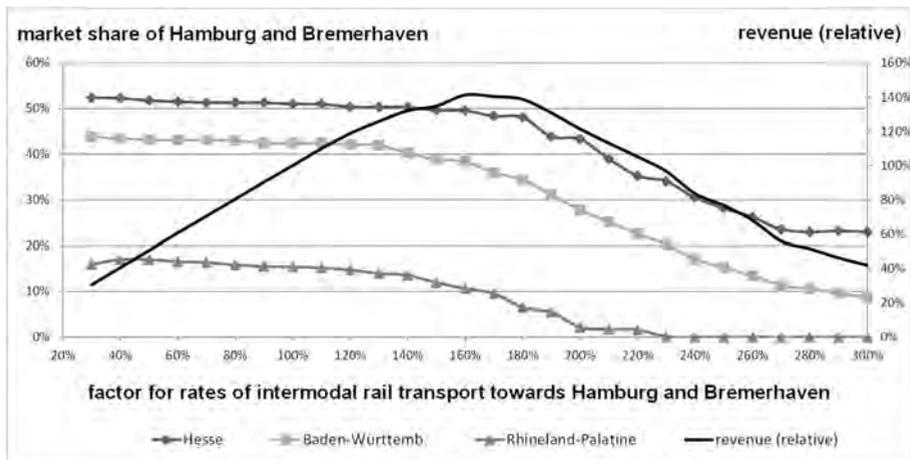


Figure 2: Market shares for federal states and revenue of the intermodal rail services towards the northern ports (relative to rate 100 %) in dependence of freight rates for intermodal rail transport towards Hamburg and Bremerhaven

Further growing rates above 130 % or 180 % cause approximately linear falling market shares of the northern ports. In Baden-Württemberg the transport volumes shift from rail transport towards the northern ports to inland waterway transport towards the western ports. The transport volumes on the waterway increase by 100 % when the rates for rail transport rise from 100 % to 300 %. In this case the barge is also preferred in the central and eastern parts of the state although considerable higher transport times, especially for the inland waterway connections from the terminal in Stuttgart. Due to the high transport costs only a small fraction is shifted to road transport (the TEU on road from Baden-Württemberg towards Antwerp and Rotterdam only increase by 18 % when rates for rail transport are tripled). Rail transport towards the western ports cannot profit and increases only by 3 % because there is no free capacity for additional transport volumes. Therefore a large potential for this transport option could be present if capacities are increased.

In contrast to Baden-Württemberg in Hesse the road transport towards the western ports is the clearly preferred option in case of higher rail rates. The TEU on road grow by 355 % for tripled rail rates, whereas rail and inland waterway transport towards Antwerp and Rotterdam increase only by 18 % and 16 % respectively. For the central and southern parts of Hesse road transport towards Hamburg and Bremerhaven is no alternative since the distance is higher than towards the Netherlands or Belgium. Only in the northern parts around Kassel the market shares remain unchanged. For very high rail rates the TEU of this region are transported on road towards the northern ports.

In Rhineland-Palatine the small market share for the northern ports (which is generated in the south-west around Mainz and Ludwigshafen) falls to 0 % when rail transport becomes more expensive. In this case road transport towards the western ports increases by 61 %, inland waterway transport only by 7 %. However with additional capacity for the waterway transport the modal split could change significantly.

In summary the described shifts of transport volumes cause a parabolic revenue curve for the intermodal rail services towards the northern ports (also shown in Figure 2). A maximum revenue can be achieved at a rate of approximately 160 % of the current freight rates. Therefore from the perspective of the intermodal operators a large potential for increasing revenues by raising their rates towards Hamburg and Bremerhaven could be present. The results further indicate that the market shares of the northern ports are quite robust in case of growing hinterland transport costs, implying a relative strong market position at least in Hesse and Baden-Württemberg.

4 Conclusion and Outlook

The simulation experiments reveal an inelastic transport demand towards the northern ports even for substantial increases in rates for rail transport towards Hamburg and Bremerhaven. Limitations of the results are the simplified model assumptions. A consideration of capacity expansions in rail and waterway transport could impact the market shares along with the seaside connectivity and port infrastructure.

Further research should not only integrate those factors in the analysis. Moreover it should be investigated how the decision behaviour could vary in dependence of the respective actor who is responsible for the overall coordination of the transport chain (shipper, carrier or freight forwarder). As example for the ocean carrier the capacity utilization of own assets (container vessels and terminals) is of great importance and could result in a bundling of transport volumes in one specific port. On contrary freight forwarders might be in general not bound to certain ports and could exploit rate differences almost immediately. Not least further empirical studies are needed in how far bounded rationality plays a role in port choice (among other things in form of loss aversion that could prevent decision makers from shifting ports or transport mode).

References

- De Borger, B., Proost, S.; Van Dender, K.: Private port pricing and public investment in port and hinterland capacity. *Journal of Transport Economics and Policy* 42 (2008) 3, pp. 527–561.
- ECORYS Nederland BV: Intermodal Links. <https://intermodallinks.com/Planner>. Last access 01.08.2017.
- Elbert, R.; Seikowsky, L.: The influences of behavioral biases, barriers and facilitators on the willingness of forwarders' decision makers to modal shift from unimodal road freight transport to intermodal road–rail freight transport. *Journal of Business Economics* 2017. Online first publication. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11573-017-0847-7>. Last access 01.08.2017
- Ishii, M.; Lee, P.T.W.; Tezuka, K; Chang, Y.T.: A game theoretical analysis of port competition. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49 (2013) 1, pp. 92–106.
- Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik (ISL); Holocher, Klaus: *Analyse der Seehafenhinterlandverkehre der bremischen Häfen bis zum Jahr 2030. Endbericht*, Bremen, 2015.

- Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik (ISL); IHS Global GmbH: Prognose des Umschlagpotenzials des Hamburger Hafens für die Jahre 2015, 2020 und 2025. Band 1: Umschlagpotenzialprognose, Bremen 2015.
- Kille, Christian.; Schmidt, Norbert: Wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Güterverkehrs. Nürnberg, Frankfurt am Main: Fraunhofer IRB Verlag 2008.
- Lee, C.Y.; Song, D.P.: Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities. *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017), pp. 442–474.
- Notteboom, T.E.; de Langen, P.W.: Container port competition in Europe. In: Lee, C.-Y.; Meng, Q. (Eds.): *Handbook of Ocean Container Transport Logistics – Making Global Supply Chain Effective*. Cham: Springer International Publishing 2015, pp. 75–95.
- Nugroho, M.T.; Whiteing, A.; de Jong, G.: Port and inland mode choice from the exporters' and forwarders' perspectives: Case study - Java, Indonesia. *Research in Transportation Business and Management* 19 (2016), pp. 73–82.
- Reis, V.: Analysis of mode choice variables in short-distance intermodal freight transport using an agent-based model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 61 (2014), pp. 100–120.
- Rodrigue, J.; Notteboom, T.: The future of containerization: perspectives from maritime and inland freight distribution. *Geojournal* 74 (2014) 1, pp. 7–22.
- Song, D.P.; Lyons, A.; Li, D.; Sharifi, H.: Modeling port competition from a transport chain perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 87 (2016), pp. 75–96.
- Statistisches Bundesamt: VGR der Länder - Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern. Reihe 1 Band 1 - 1991 bis 2016. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/VGRderLaender/VGR_LaenderergebnisseBandI.html;jsessionid=E323C6A1969E5F9FCF8E38B44E969184.cae3. Last access 01.08.2017.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Exportquote im Bundesländervergleich 2015. https://www.statistik-bw.de/HandelDienstl/Aussenhandel/AH-XP_exportquote.jsp. Last access 01.08.2017.
- Steven, A.B.; Corsi, T.M.: Choosing a port: An analysis of containerized imports into the US. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48 (2012) 4, pp. 881–895.
- Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e. V.: Intermodal Map. <http://www.intermodal-map.com/de/freie-karte>. Last access 01.08.2017.
- The AnyLogic Company: Why AnyLogic?. <http://www.anylogic.de/features>. Last access 01.08.2017
- Tongzon, J.L.: Port choice and freight forwarders. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45 (2009) 1, pp. 186–195.
- World Bank: Container port traffic. <http://data.worldbank.org/indicator/IS.SHP.GOOD.TU>. Last access 01.08.2017.
- Ye, Y.; Shen, J.; Bergqvist, R.: High-Capacity Transport Associated with Pre- and Post-Haulage in Intermodal Road-Rail Transport. *Journal of Transportation Technologies* 4 (2014) 3, pp. 289–301.
- Yuen, C.L.A.; Zhang, A.; Cheung, W.: Port competitiveness from the users' perspective: An analysis of major container ports in China and its neighboring countries. *Research in Transportation Economics* 35 (2012) 1, pp. 34–40.

Simulation konträrer Instandhaltungsstrategien für Offshore-Windenergieanlagen

Simulation of Contrary Maintenance Strategies for Offshore Wind Turbines

Stephan Oelker, Marco Lewandowski, Michael Freitag, Universität Bremen
Fachbereich Produktionstechnik, Bremen (Germany), oel@biba.uni-bremen.de,
lew@biba.uni-bremen.de, fre@biba.uni-bremen.de

Abderrahim Ait Alla, BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an
der Universität Bremen, Bremen (Germany), ait@biba.uni-bremen.de

Abstract: This paper describes a multi-agent-based discrete-event simulation of the maintenance processes of offshore wind turbines. First, a brief overview of the challenges for the operation and maintenance of offshore wind turbines in general will be given and the state of the art in the field of simulation of offshore operation and maintenance processes will be expressed. Subsequently, the structure of the simulation model will be explained and the simulation results for reactive and predictive maintenance strategies will be discussed. Based on the simulation model, the contribution of a better failure forecast to the maintenance costs will be investigated.

1 Einleitung

Die Industrienationen haben sich weltweit auf die Reduzierung der Emissionen zur fossilen Energieerzeugung geeinigt, um dem globalen Klimawandel entgegen zu wirken. In diesem Zusammenhang wird für die Erzeugung von Strom aus regenerativen Rohstoffen häufig die Windenergie aufgrund der hohen Windverfügbarkeit sowie der technisch ausgereiften Anlagen eingesetzt (Lynn 2011). Insbesondere die Offshore-Windenergie ist für den Erfolg der Energiewende von zentraler Bedeutung. Daher hat sich die Anzahl der Windenergieanlagen auf dem Meer in den letzten Jahren auch signifikant erhöht. So sind allein in der Deutschen Nord- und Ostsee 947 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 4.108 Megawatt in Betrieb (Stiftung Offshore Windenergie 2017). Allerdings besteht weiterhin die Herausforderung, die Stromgestehungskosten von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) zu senken, da diese derzeit im Vergleich zu anderen Energiequellen relativ hoch sind (Kost et al. 2013). Eine Möglichkeit, um auf den Kostendruck zu reagieren, besteht in der Senkung der Kosten während der

Betriebsphase, da 15-30 % der Total Cost of Ownership während dieser Phase entstehen (Besnard et al. 2013; Martin et al. 2016). Jedoch ist der Betrieb und die Instandhaltung von OWEA im Vergleich zu Onshore-Windenergieanlagen deutlich schwieriger. Dies liegt vor allem daran, dass die Instandhaltung von OWEA vielen Herausforderungen und Restriktionen, wie z. B. der eingeschränkten Zugänglichkeit aufgrund der Wetterbedingungen, unterliegt (Oelker et al. 2014; Martin et al. 2016). Zur Verbesserung der Planung, Steuerung und Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen ist es erforderlich, die Schäden an den Anlagen möglichst früh zu erkennen. Da in der Regel Störungen erst mit deren Eintritt detektiert werden, stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, in weitere Sensorik- und Technologieentwicklungen zu investieren, um die Fehler früher zu erkennen. Vor diesem Hintergrund wird eine Simulationsstudie durchgeführt, um den Einfluss einer besseren und damit frühzeitigen Prognose von Schäden in Bezug auf die Instandhaltungskosten bewerten zu können.

2 Herausforderungen für den Betrieb und die Instandhaltung von Offshore-Windenergieanlagen

OWEA sind rauen maritimen Bedingungen ausgesetzt, wodurch es häufiger zu Fehlern oder Ausfällen kommt. In der Literatur wird die technische Verfügbarkeit mit Werten zwischen 60 und 90 % angegeben (Scheu et al. 2012; Netland et al. 2014), welches im Vergleich zu Onshore-Windenergieanlagen (97-99 %) sehr gering ist (Institut für Solare Energieversorgungstechnik 2008). Eine Ursache hierfür ist, dass die logistischen Prozesse für die Instandhaltung von OWEA sehr komplex und dadurch kostenintensiv sind, sodass die Instandsetzung im Fehlerfall mehr Zeit in Anspruch nimmt. Dies liegt zum einen daran, dass die Komponenten von OWEA sehr große Dimensionen aufweisen und im Fehlerfall zum Teil Spezialschiffe eingesetzt werden müssen. Zum anderen schränken speziell die Wetterbedingungen die Zugänglichkeit der Anlagen stark ein und haben aus diesem Grund große Auswirkungen auf die Durchführbarkeit der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen. Je nachdem, wie weit der Windpark vom zugeordneten Servicestützpunkt entfernt ist, wird ein entsprechend langes Wartungsfenster benötigt, um die Reparaturen durchführen zu können.

In einer Studie von Roland Berger (2013) wird analysiert, dass neue Betriebs- und Instandhaltungsstrategien zu hohen Einsparungspotenzialen führen können, wobei diese vor allem durch technologische Innovationen gestützt werden müssen. Hier spielen vor allem datenbasierte Ansätze zur Bewertung des Zustands und der Restlebensdauer einer Anlage bzw. der einzelnen Komponenten eine bedeutende Rolle. Die modernen Anlagentypen auf See und an Land sind bereits mit Zustandsdiagnosesystemen (engl. Condition Monitoring System (CMS)) ausgestattet, welche den Zustand der Anlagen abbilden. Basierend auf den Sensordaten werden u. a. im Falle einer Störung der Anlage Instandhaltungsmaßnahmen initiiert. Hierfür ist jedoch ein gewisser Vorlauf notwendig, um die Maßnahme effizient durchführen zu können. Faktisch werden die Instandhaltungsprozesse in den meisten Fällen allerdings erst dann angestoßen, wenn eine Störung bereits aufgetreten ist. Dies lässt sich als reaktive Instandhaltungsstrategie beschreiben (vgl. Schenk 2010). Dementsprechend führt die aktuelle Situation dazu, dass die Anlagen durch Beschädigungen ausfallen und die

Instandhaltungsmaßnahmen nicht sofort durchgeführt werden können. Dadurch entstehen erhebliche Kosten für den Ausfall, für Ausfallfolgekosten sowie für logistische Sonderprozesse.

Im Sinne einer Optimierung der Instandhaltungsmaßnahmen ist es daher erforderlich, dass sich abzeichnende Fehler an den Komponenten früher erkannt werden, also bevor der Ausfall einer Anlage droht. Zur Fehlerprognose bieten Methoden aus dem Bereich Data Analytics vielversprechende Ansätze, um die Restlebensdauer der jeweiligen Komponente bzw. des Gesamtsystems zu beurteilen, selbst unter Berücksichtigung der gegebenen Prognoseunschärfe. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojekts „preInO – Methoden und Werkzeuge für die preagierende Instandhaltung von Offshore Windenergieanlagen“ werden die entsprechenden Grundlagen für die risikobasierte Prognose des Systemzustands entwickelt (Freitag et al. 2015). Jedoch wird auch deutlich, dass jede Komponente individuell betrachtet werden muss, um automatisiert eine gute Prognose bzw. Diagnose über den Systemzustand geben zu können. Teilweise besteht derzeit das Problem, dass zusätzlich benötigte Sensorik in vielen der betrachteten Anlagen derzeit noch nicht vorhanden ist. Daher stellt sich die Frage, welche Einsparungspotenziale sich durch die Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie heben lassen bzw. genauer, ob eine Investition in neue Sensorik und Technologien sinnvoll ist und zu einem Return-on-Investment führen kann. Aufgrund der Komplexität der Prozesse mit stark variierenden Prozesszeiten und zahlreichen Abhängigkeiten ist jedoch eine Bewertung bzw. ein Nachweis mit konventionellen Methoden der Investitionsrechnung nicht möglich. Daher wird ein Simulationsmodell entwickelt, welches alle Instandhaltungsprozesse und deren Restriktionen für OWEA abbildet und zugleich in der Lage ist, sowohl eine reaktive als auch eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie abzubilden. In der Simulation werden dazu die Einsparungspotenziale für Prognosefenster von 72 bzw. 168 Stunden untersucht, also der Zeitraum, in dem Schäden bzw. mögliche Beschädigungen erkannt werden, ohne dass diese bereits Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit des Systems haben.

3 Stand der Technik zur Simulation von Offshore-Betriebs- und Wartungsprozessen

Die Simulation wird im Bereich der Windenergie an verschiedenen Stellen bereits erfolgreich eingesetzt. Neben dem Aufbau von Modellen zur Simulation, sind vor dem Hintergrund der Themenstellung vor allem die Modelle, die den Betrieb und die Instandhaltung von OWEA simulieren, zu erwähnen (Martin et al. 2016). Auch Greiner et al. (2015) haben die Simulation zur Analyse des Betriebs von Windenergieanlagen genutzt. Scheu et al. (2012) haben ein Simulationsmodell entwickelt, um die Betriebsphase von Windenergieanlagen zu simulieren. Ziel war es, den Einfluss bestimmter Parameter, wie die Änderung der Wellenhöhengrenze der eingesetzten Schiffe und die Änderung der Wettervorhersage, zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beeinflussung dieser Parameter die Verfügbarkeit und die Wirtschaftlichkeit der Offshore-Windparks erhöhen kann. Im Gegensatz zu den vorgestellten Ansätzen, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht nur einzelne Prozesse bewertet und Entscheidungsunterstützungen gegeben, sondern der

komplette Instandhaltungsprozess von OWEA mit sämtlichen Restriktionen und realen Prozesszeiten abgebildet, um konträre Strategien miteinander vergleichen zu können.

Der Stand der Technik in Hinblick auf die Instandhaltungslogistik von OWEA wird in Shafiee (2015) untersucht. Die Instandhaltungsprozesse wurden dabei in Hinblick auf die operativen, taktischen und strategischen Auswirkungen analysiert. Zudem wurde herausgefunden, dass trotz der Anzahl der veröffentlichten Studien, ein großer Bedarf an neuen Entwicklungen im Bereich des Betriebs und der Instandhaltung von OWEA erforderlich ist.

4 Struktur des Simulationsmodells

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine multiagentenbasierte, ereignisdiskrete Simulation der Instandhaltungsprozesse von OWEA entwickelt, wobei alle Restriktionen in den Prozessen abgebildet worden sind. Die Simulation ist mit dem Simulationswerkzeug AnyLogic (AnyLogic 2017) erzeugt worden und bildet sowohl eine reaktive als auch eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie ab. Über das Simulationswerkzeug werden die Windenergieanlagen und die weiteren Entitäten als Agenten abgebildet. Diese sind so miteinander verknüpft, dass über definierte Nachrichten in der Simulation die unterschiedlichen Prozesse angestoßen werden. Die Prozesse sind dabei möglichst detailreich abgebildet und mit stochastisch variierenden Prozesszeiten versehen worden. Als Verteilungsfunktion wird eine exponentielle Verteilung für das Störungsintervall und eine Uniformverteilung für die Reparaturdauer gewählt. Auf diese Weise wird insbesondere der Faktor Mensch bei der Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt.

In der entwickelten Simulation werden reale Wetterdaten aus dem Datensatz „CoastDat“ und ein Modell mit unterschiedlichen Fehlerkategorien implementiert, um die unterschiedlichen Störungen abzubilden. Hierbei wird auch bedacht, welche Transportmittel für die Durchführung der unterschiedlichen Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich sind. Berücksichtigt wird neben einem Crew Transfer Vessel (CTV) und einem Helikopter auch ein Installationsschiff, welches zum Austausch bzw. zur Reparatur größerer Komponenten benötigt wird. Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und der Servicetechniker sind weitere Aspekte, welche in Rahmen der Simulation abgebildet werden. Weiterhin sind alle Prozesse mit Kosten versehen. Zudem wird eine Berechnung der Energieproduktion unter Einbeziehung der vorherrschenden Wetterbedingungen durchgeführt. Um die unterschiedlichen Strategien zu vergleichen, werden als Ergebnisgrößen die Key Performance Indikatoren technische Verfügbarkeit, produzierte Energie sowie entstehende Instandhaltungskosten in der Simulationsumgebung definiert.

Alle Akteure, die am Instandhaltungsprozess beteiligt sind, werden im Simulationsmodell als Agenten modelliert. Jeder Agent verfügt dabei über eine eigene Logik und wird über Zustandsdiagramme oder Prozessmodellierungs-bibliotheken modelliert. Die Agenten interagieren miteinander, indem bestimmte Nachrichten gesendet werden, deren Empfang Ereignisse auslösen. Wenn z. B. das CMS eine Mitteilung über eine Störung erzeugt, wird eine Nachricht zur Leitwarte geschickt. In der Leitwarte wird die gemeldete Störung bearbeitet. Handelt es sich um eine echte Störung, wird eine Meldung mit dem Störungstyp generiert und an den

Instandhaltungsservice weitergeleitet. Dieser überprüft sowohl die Verfügbarkeit von Ressourcen, Ersatzteilen und notwendigen Wetter und generiert anschließend einen Auftrag. Der Auftrag wird dann in Form einer Nachricht an das Serviceteam weitergeleitet, welches die Instandhaltungsmaßnahme durchführt (Abb. 1).

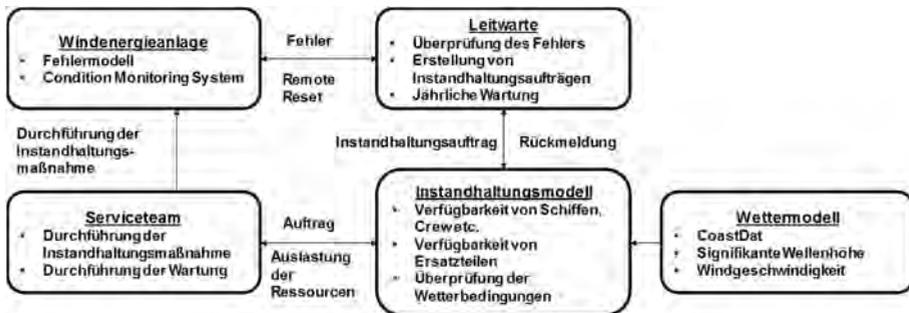


Abbildung 1: Struktur der entwickelten Simulation

Die OWEA ist in der Simulation über ein Zustandsdiagramm abgebildet, welches das ereignis- und zeitgesteuerte Verhalten der Windenergieanlage beschreibt (Abb. 2). Der Wechsel von einem Betriebszustand zu einem Ausfallzustand wird durch die Auslösung eines Fehlerereignisses beschrieben, welches durch entsprechende Ausfallraten bestimmt wird (Tab. 1).

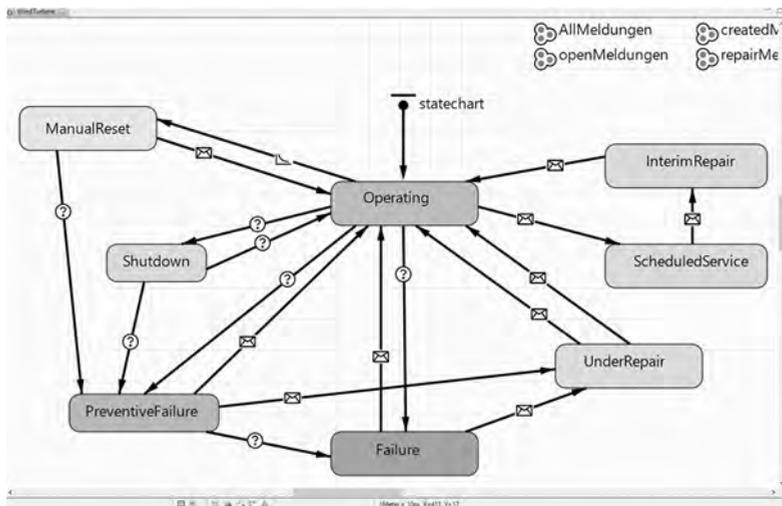


Abbildung 2: Modellaufbau einer Windenergieanlage – Zustandsdiagramm

Der Übergang von Ausfallzustand zum normalen Betriebszustand wird durch ein Meldungsereignis des Serviceteams initiiert, welches die Instandhaltungsaktivitäten durchgeführt hat. Darüber hinaus besitzt die Windenergieanlage einen präventiven Ausfallzustand, der die vorausschauende Strategie abbildet. In diesem Fall wechselt die Windturbine ihren Zustand in den präventiven Ausfallzustand, wenn eine

mögliche Störung vorzeitig erkannt wird. Sollte die Windenergieanlage trotz der verbesserten Planungsgrundlage nach einer definierten Zeit nicht instandgesetzt worden sein, wechselt ihr Zustand in „Ausfall“.

Table 1: Reparaturtypen bzw. Fehlerklassen von Offshore-WEA (Oelker et al. 2016)

Reparaturumfang	Restriktionen der Instandhaltung	Ausfallrate
Ferngesteuerter Neustart	- Instandsetzungsdauer = Ø 2 Stunden	Ø Alle 2 Wochen
Kleine Reparaturen	- Instandsetzungsdauer = Ø 6 Stunden	Ø Alle 3 Monate
	- Helikopter oder CTV mit 3 Technikern erforderlich	
Große Reparaturen	- Instandsetzungsdauer = Ø 12 Stunden	Ø Alle 6 Monate
	- CTV mit einem Kran und 3 Techniker erforderlich	
Austausch Großkomponenten	- Instandsetzungsdauer = Ø 24 Stunden	Ø Alle 18 Monate
	- Installationsschiff mit großem Kran und 6 Techniker erforderlich	
Jährliche Wartung	- Inspektionszeit = Ø 72 Stunden pro OWEA	Einmal im Jahr
	- Installationsschiff mit 6 Technikern erforderlich	

Um in der Simulation unterschiedliche Störungen abbilden zu können, werden die Ausfälle für alle Fehlerklassen der Windenergieanlagen auf Basis einer exponentiellen Verteilungsfunktion mit $\lambda = 1 /$ (Ausfallrate in Stunden), basierend auf Angaben aus der Literatur, modelliert (vgl. Oelker et al. 2016). Dabei wird zwischen verschiedenen Reparaturtypen unterschieden (Tab. 1). Auch die Reisezeiten werden in der Simulation berücksichtigt, so benötigt ein Hubschrauber mit einer Reisegeschwindigkeit von 220 km/h über offenem Meer ca. 14 Minuten für die Strecke von 50 km, während ein Crew Transfer Vessel mit einer Servicegeschwindigkeit von 20 kn ca. 81 Minuten braucht. Durch den Vergleich zwischen der in der Simulation erzielten Verfügbarkeit mit der Verfügbarkeit einer OWEA in Norddeutschland und der in der Literatur zitierten OWEA-Verfügbarkeiten wird das Simulationsmodell validiert (Scheu et al. 2012; Netland et al. 2014).

Damit die Simulation und die Ergebnisse der breiten Öffentlichkeit vorgestellt und die Entscheidungsoptionen und deren Auswirkungen hinsichtlich einer Investition in CMS-Technologie diskutiert werden können, ist zudem eine Benutzeroberfläche entwickelt worden, mit der der Anwender die Möglichkeit besitzt, an einem Multitouch-Tisch selbstständig verschiedene Szenarien in Hinblick auf die Netzwerkstrukturen zu simulieren. Die über diese Benutzeroberfläche änderbaren Parameter sind die Standorte der Servicestation und der Windenergieanlagen sowie die Anzahl der Anlagen und die Wahl der Instandhaltungsstrategie. Die Simulation berücksichtigt anschließend automatisch die gewählten Parameter und berechnet die

zuvor beschriebenen Key Performance Indikatoren für den Betrieb und die Instandhaltung der Anlagen. Die Oberfläche ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Simulationsoberfläche am Beispiel eines Windparks in der Nordsee

5 Simulationsparametrisierung und -ergebnisse

Das Ziel der entwickelten Simulation ist zu untersuchen, welche Einsparungspotenziale durch eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie in der Betriebsphase einer OWEA gehoben werden können. Dies geschieht vor dem Hintergrund die Amortisationsdauer für die notwendigen Entwicklungen und Technologien berechnen zu können. Zur Abbildung der Wetterbedingungen werden aus dem Datensatz „CoastDat“ der Zeitraum 2000 bis Ende 2007 mit stündlicher Auflösung verwendet. Abbildung 4 zeigt die durchschnittliche Verfügbarkeit von 3-stündigen Wetterfenstern für jede Transportressource für den in der Simulation verwendeten Wetterdatensatz. Zur Verdeutlichung liegt die Wahrscheinlichkeit, dass ein CTV im Januar für einen 3-stündigen Einsatz aufgrund der Wetterrestriktionen genutzt werden kann bei 52 %. Zwischen Mai und August liegt die Wahrscheinlichkeit jedoch bei ca. 88 %. Die Abbildung zeigt, dass die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen bedingt durch die Wetterrestriktionen in den Sommermonaten einfacher zu organisieren ist, als in den Wintermonaten. Vor diesem Hintergrund kommt es in den Wintermonaten häufiger zu kostenintensiven Helikoptereinsätzen bzw. zu längeren Anlagenstillständen, da diese nicht angefahren werden können. In der Simulation wird überprüft, ob für den Einsatz ein geeignetes Wetterfenster zur Verfügung steht. Ist dies nicht der Fall, wird der Einsatz solange verzögert, bis die Wetterbedingungen den Anforderungen entsprechen.

Im Rahmen der Simulation wird ein Windpark mit 40 Anlagen betrachtet, welcher sich ca. 50 Kilometer vom Basishafen Bremerhaven entfernt in der Nordsee befindet. Zudem wird der Betrieb über acht Jahre analysiert. Zur Ermittlung der Einsparungspotenziale, welche mit einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie gehoben werden können, sind unterschiedliche Simulationsszenarien definiert worden. Das Unterscheidungsmerkmal ist die eingesetzte Instandhaltungsstrategie. Bei einer reaktiven Instandhaltungsstrategie wechselt die OWEA ihren Zustand auf Störung, sobald eine solche gemeldet worden ist.

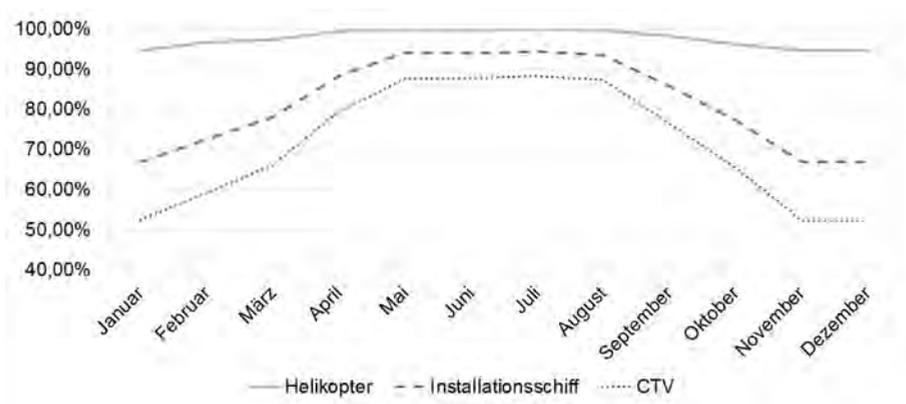


Abbildung 4: Verfügbarkeit eines 3-stündigen Wetterfensters je Ressource für die Jahre 2000-2007

Zu diesem Zeitpunkt kann auch frühestens mit der Planung und Durchführung der Instandhaltungsmaßnahme begonnen werden. Wird hingegen eine vorausschauende Strategie betrachtet, wechselt die Anlage bei einer Störung zunächst in einen präventiven Ausfallzustand, läuft aber bis zu einem definierten Zeitpunkt weiter. Im Rahmen der hier durchgeführten Simulation werden realistische Zeitfenster von 72 oder 168 Stunden ausgewählt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Simulation

Instandhaltungsstrategie	Präventives Zeitfenster Stunde	Verfügbarkeit %	Energieproduktion GWh			Durchschnittliche Instandhaltungskosten (Million €)		
			min	Ø	max	Transport	Material	Produktionsverlust
Reaktive	0	83,7 86,63 89,2	13,8	14,4	14,9	56,9	47,34	225,5
Vorausschauend	72	90,3 92,48 94,1	15,0	15,3	15,5	55,8	38,98	128,9
	168	91,4 94,04 95,3	15,2	15,6	15,8	56,5	32,97	102,4

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, ist die Anzahl an Simulationsläufen je Simulationsszenario auf 100 Replikationen festgelegt worden. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass viele Simulationsparameter stochastisch sind und somit für jeden Simulationslauf nach dem Monte-Carlo-Prinzip andere Werte aufweisen. Die in Tabelle 2 dargestellten Ergebnisse zeigen die Mittelwerte der durchgeführten Simulationen. Es zeigt sich, dass die Einsparungspotenziale einer vorausschauenden Strategie selbst für einen relativ kleinen Windpark erheblich sind. So fallen für die Instandhaltung eines Windparks über acht Jahre gemäß den Ergebnissen der Simulation mit einer reaktiven Strategie Kosten in Höhe von ca. 330 Millionen Euro

an. Sofern die Fehler nur 72 Stunden vor ihrem Auftreten festgestellt werden können, lassen sich die Kosten um ca. 107 Millionen Euro bzw. 32,2 % reduzieren, wobei noch nicht berücksichtigt worden ist, dass auch die Verfügbarkeit der Anlagen und somit die produzierte Energie steigt. Umgerechnet auf die derzeit genehmigte Lebensdauer einer OWEA von 20 Jahren entspricht dies ein Einsparungspotenzial von 6,5 Millionen Euro pro Anlage. Grundsätzlich bleiben die Transportkosten in etwa auf gleichem Niveau, da die Fahrten zu den Anlagen nicht zu vermeiden sind. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Einsparungspotenzial einer vorausschauenden Strategie vor allem in der Reduzierung der Materialkosten und der Produktionsverluste liegt. Dies liegt vor allem daran, dass durch eine bessere Planbarkeit der Instandhaltungsmaßnahmen sowohl die Stillstände von OWEA als auch die Ausfallfolgen reduziert werden können. Dies führt dazu, dass die Produktionsverluste bzw. Materialkosten verringert werden können.

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen der vorgestellten Simulation ist ein Simulationsmodell entwickelt worden, welches sämtliche Prozesse für die Instandhaltung von OWEA abbildet und zudem insbesondere die Wetterrestriktionen berücksichtigt. Mit der Simulation wurde untersucht, welche Einsparungspotenziale mit einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie für OWEA gehoben werden können. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie zeigen erhebliche Einsparungspotenziale. Für die Umsetzung einer vorausschauenden Strategie ist jedoch eine genaue Kenntnis über den Zustand der einzelnen Komponenten bzw. des Gesamtsystems notwendig. Durch die Entwicklung neuer Technologien und Sensorik im Hinblick auf einen datenbasierten Ansatz für eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie könnten diese Potenziale realisiert werden. Neben der allgegenwärtigen Motivation der Nutzung von CMS-Technologien zur Fehlervermeidung sollte im Rahmen der Investitionsbetrachtung vor allem auch die verbesserte Planbarkeit der Instandhaltungstätigkeiten in den Fokus rücken.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „preInO – Methoden und Werkzeuge für die präagierende Instandhaltung von Offshore Windenergieanlagen“, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen „0325587A“ gefördert worden ist.

Literatur

- AnyLogic: Mehr-Methoden Simulationssoftware. Verfügbar unter <http://www.anylogic.de/>. Letzter Zugriff am 27.04.2017.
- Besnard, F.; Fischer, K.; Tjernberg, L.B.: A model for the optimization of the maintenance support organization for offshore wind farms. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 4 (2013) 2, S. 443-450.
- BWE Bundesverband Windenergie: Ausbautzahlen 2016 Offshore-Windenergie. 2017. <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/2017/agow-bwe->

- stiftung-offshore-windenergie-udma-und-wab-ausbauzahlen-2016. Letzter Zugriff am 20.04.2017.
- Freitag, M.; Oelker, S.; Lewandowski, M.; Murali, R.: A Concept for the Dynamic Adjustment of Maintenance Intervals by Analysing Heterogeneous Data. In: Wulfsberg, J.; Röhlig, B.; Montag, T. (Hrsg.): Applied Mechanics and Materials. Progress in Production Engineering. Trans Tech Publications Inc, Pfaffikon, Schweiz, 2015, S. 507-515.
- Greiner, S.; Appel, S.; Joschko, P.; Renz, T.; Albers, H.: German Offshore Wind Operation Guide. www.systop-wind.de/fileadmin/pdf/systop_gowog_20150630_webseite.pdf. Letzter Zugriff am 24.04.2017.
- Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH (2012). coastDat-1 Waves North Sea wave spectra hindcast (1948-2007). World Data Center for Climate (WDCC) am DKRZ. https://doi.org/10.1594/WDCC/coastDat-1_Waves.
- Institut für Solare Energieversorgungstechnik: Windenergie Report Deutschland 2008.
- Kost, C.; Mayer, J.N.; Thomsen, J.; Hartmann, N.; Senkpiel, C.; Philipps, S.; Nold, S.; Lude, S.; Schlegl, T: Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Fraunhofer ISE (2013).
- Lynn, P.A.: Onshore and offshore wind energy: an introduction. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2011, S. 1-4.
- Netland, Ø; Sperstad, I.B.; Hofmann, M.; Skavhaug, A.: Cost-benefit evaluation of remote inspection of offshore wind farms by simulating the operation and maintenance phase. *Energy Procedia* 53 (2014), S. 239-247.
- Martin, R.; Lazakis, I.; Barbouchi, S.; Johanning, L.: Sensitivity analysis of offshore wind farm operation and maintenance cost and availability. *Renewable Energy* 85 (2016), S. 1226-1236.
- Oelker, S.; Lewandowski, M.; Schlalos, I.: Instandhaltungsplanung und -steuerung basierend auf Condition Monitoring und Zuverlässigkeit – Preagierende Instandhaltung am Beispiel von Offshore-Windenergie. In: Nienhaus, K.; Burgwinkel, P. (Hrsg.): Tagungsband zum 10. Aachener Koll. für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung. Stolberg: Verlag R. Zilkens, 2014, S. 195-203.
- Oelker, S.; Ait Alla, A.; Lewandowski, M.; Freitag, M.: Planning of maintenance resources for the service of offshore wind turbines by means of simulation. In: Freitag, M.; Kotzab, H.; Pannek, J. (Hrsg.): Dynamics in Logistics. Proceedings of the 5th International Conference on Dynamics in Logistics Bremen, Germany. Springer International Publishing, 2016, S. 303-312.
- Roland Berger Strategy Consultants: Offshore wind toward 2020 - On the pathway to cost competitiveness. http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Offshore_Wind_Study_20130506.pdf. Letzter Zugriff am 24.04.2017.
- Schenk, M.: Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Springer-Verlag 2009.
- Scheu, M.; Matha, D.; Hofmann, M.; Muskulus, M.: Maintenance strategies for large offshore wind farms. *Energy Procedia* 24 (2012), S. 281-288.
- Shafiee, M.: Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives. *Renewable Energy* 77 (2015), S. 182-193.

Zielgerichtete, simulationsgestützte Optimierung von Routenzugsystemen

Target-oriented, Simulation-based Optimization of Internal Milk-run Systems

Andreas Martini, Tobias Mauksch, Ulrich Stache, Universität Siegen, Siegen
(Germany), Andreas.Martini@uni-siegen.de, Tobias.Mauksch@uni-siegen.de,
Ulrich.Stache@uni-siegen.de

Abstract: Against the background of often sub-optimally planned resp. implemented systems, the optimization of existing internal milk-run systems promises considerable potential. There has not been any methodical support from the user's point of view yet to realize these potentials. This article describes an application-oriented and model-based method which supports the identification of expedient optimization measures considering design aspects by means of a static-deterministic simulation in Microsoft Excel. The application of the method and the Excel tool is shown by means of a case study. This shows that a target-oriented optimization of inefficiently planned resp. operated internal milk-run systems is possible by methodical and software implemented support. Moreover, there is additional research demand regarding a further development of the method as well as to develop comprehensive planning approaches considering the planning functions designing, dimensioning and scheduling.

1 Ausgangssituation, Motivation und Problemstellung

In der innerbetrieblichen Produktionsversorgung finden Routenzugsysteme wegen ihrer Fähigkeit zur hochfrequenten Andienung mit kleinen Transportlosen zunehmend Verbreitung (Klug 2010). Die Planung derartiger Systeme ist eine sehr komplexe Aufgabenstellung. Sie weisen eine Vielzahl von Gestaltungsmerkmalen mit oftmals zahlreichen Ausprägungen auf, wobei deren Verträglichkeit untereinander nicht zwangsläufig gegeben ist. Weiterhin stehen weder allgemeingültige Erkenntnisse über die Wirkungsrichtungen und -intensitäten der Wahl von Gestaltungsalternativen zur Verfügung noch sind die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen ihnen bekannt (Martini et al. 2015). Somit sind die Abschätzung der Folgen einer Auswahlentscheidung von Gestaltungsalternativen für die Zielgrößen des Systems in der Planungsphase ausgeschlossen und eine zielorientierte, systematische Planung von Routenzugsystemen nur bedingt und auf der Basis von Erfahrungen und Vermutungen möglich.

In der Literatur finden sich in den Bereichen der Produktionstechnik, des Operations Research (OR) sowie der Softwareentwicklung zahlreiche Methoden zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen (Martini et al. 2014) (Abb. 1). Die Ansätze der Produktionstechnik sind zumeist regelbasiert, bauen auf einfachen Berechnungen und vereinfachenden Annahmen auf. Das vorrangige Ziel ist die Erzeugung funktionierender Lösungen, das Finden des globalen Optimums wird als nachrangig angesehen. Die Verfahren des OR beschränken sich auf Teilprobleme, bilden diese in Form von Gleichungssystemen ab und lösen mittels gängiger linearer Optimierungsverfahren. Im Mittelpunkt steht die Methodenentwicklung, nicht das umsetzbare Ergebnis. Das Ziel der routenzugspezifischen Software besteht darin, die Dimensionierungs-, Dispositions- und Optimierungsverfahren des OR für reale Problemstellungen anwendbar zu machen, gestalterische Aspekte werden nur am Rande betrachtet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein methodischer Ansatz fehlt, der eine ganzheitliche Bewertung und Analyse sowie eine darauf aufbauende zielgerichtete Optimierung von geplanten oder bestehenden Routenzugsystemen aus Anwendersicht ermöglicht.

2 Grundsätzliche Funktionsweise der Methode

Ausgangspunkt der Methode ist ein Routenzugsystem, das (zumindest planerisch) in den wesentlichen Komponenten (Fahrzeugtechnik, Behältertechnik, Route, Bereitstellorte, Pufferkapazitäten) definiert ist. Die Anwendung der Methode vollzieht sich in drei Stufen (Abb. 2):

- **Bewertungsmodell:** Berechnung von Bewertungskennzahlen des geplanten oder vorliegenden Routenzugsystems anhand eines vorgegebenen Kennzahlensystems
- **Analysemodell:** Berechnung der Wirkungen von Variationen der Eingangsparameterwerte des Bewertungsmodells und Bildung einer Rangfolge hieraus
- **Optimierungsmodell:** Bestimmung eines Optimierungspfades zur iterativen Verbesserung der Zielerreichungsgrade

Die oben genannten Berechnungen werden in einer statisch-deterministischen Simulation vorgenommen, die mit Hilfe eines selbstentwickelten Microsoft Excel-Tools ausgeführt wird. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist, dass die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen den Gestaltungsalternativen einer analytischen Betrachtung des Routenzugsystems im Wege stehen. So ist für ein bestehendes System beispielsweise nicht unmittelbar absehbar, welche Auswirkungen sich aus der Variation der Puffergröße an den Bereitstellorten auf die verschiedenen Zielgrößen ergeben. Anders als in der Ablaufsimulation wird im vorliegenden Fall nicht die Zeit variiert, sondern die diskreten (z. B. Anzahl Palettenplätze) und die kontinuierlichen (z. B. Fahrgeschwindigkeit) Eingangsparameterwerte. Durch systematische Parametervariationen der Eingangsgrößen des Modells erhält man fallspezifische Aussagen zu den Wirkungen hinsichtlich Richtung und Intensität.

	Legende: ○ ansatzweise behandelt ● behandelt	Funktion				Transport- bedarf	Verfahren															
		Gestaltung	Dimensionierung	Disposition	Bewertung		Optimierung	konstant	variabel	Empfehlung	Wissensbasis	Berechnungsvorschrift	Exakter Algorithmus	Heuristik	Graphentheoretisches Verfahren	Naturanaloges Verfahren	Simulation	Kriterienkatalog	Kennzahlen	Sensitivitätsanalyse	Multikriterielle Bewertung	Investitionsrechnung
Produktionstechnik	[HARRIS ET AL. 2003]	●	●				●	●	●	●												
	[COSTA ET AL. 2008]	○	○	○	○	○									●		○					
	[ABELE, BRUNGS 2009]	○	○	○	○	●	●	●		○												
	[RAPOSO ET AL. 2009]	○	●	○	○	●	●	●							●		○	●				
	[DROSTE, DEUSE 2011]		○	○	○	○	●			○	○							○	○			
	[DROSTE 2013]	●	●		○	○	●	●	●	●	●						○	○	○			
	[MEINHARDT, SCHMIDT 2012]		●	○			●				●						○	○	○			
	[KRAMPS 2012]	○	○	○	○	○	●	○			●							○	○	○		
	[WANNER ET AL. 2012]	○	○	○	○	○	●									●		○	○	○		
	[BRUNGS 2012]	●	●		○		●	●	●	●							○	○				
	[GÜNTHER ET AL. 2012a]	●					●	●	●								○					
	[WIEGEL ET AL. 2013]		●	○	○	○	●	●								●		○	○			
	[GÜNTHER ET AL. 2013a]	●	●				●	●	●	●												
	[KRAUSE ET AL. 2014]	○					●		○			○										
[KRAUSE ET AL. 2015]	○		○			●		○										○				
[KRAUSE ET AL. 2016]	○		○			●		○										○				
[VDI 2016b] & [VDI 2016c]	●	●		○		●	●	●	●									●				
Operations Research	[ELSNER 1991]		●	●	○	○	●	●						●	●		○				●	
	[VAIDYANATHAN ET AL. 1999]		●	●	○	○	●	●						●	●		●	●		○		
	[CIEMNOCZOŁOWSKI 2007]		●	○	○	○	●	○		○		●		●	●		○	●		○		
	[Sly 2008]		●	●	○	○	●	●	●					●	●		○					
	[EMDE 2011]		●	●	○	○	●	●	○			●					○	●				
	[GOLZ ET AL. 2012]		●	●	○	○	●	●	●					●	●		○	○				
	[GOLZ 2014]		●	●	○	○	●	●	●					●	●		○	○				
	[KIJC ET AL. 2012]	○	●	●	○	○	●	●	○			●					○					
	[SATOGLU, SAHIN 2013]		●	○	○	○	●	●	●					●	●		○	○				
	[GYULAI ET AL. 2013]		●	●	○	○	●	●	●					●	●		○					
	[FACCIO ET AL. 2013a]		●	●	○	○	●	●	●			●				●	●	●	●			
	[FACCIO ET AL. 2013b]		●	●	○	○	●	●	●			●				●	●	●	●			
	[ALNAHAL, NOCHE 2013]		●	●	○	○	●	●	●			●	●				○					
	[ALNAHAL 2015]		●	●	○	○	●	●	●			●	●			○	●	●	●			
	[FATHI ET AL. 2014a]		●	●	○	○	●	●	●			●	●			○	○	○	○			
	[FATHI ET AL. 2014b]		●	●	○	○	●	●	●			●	●			○	○	○	○			
[DEWITZ ET AL. 2014]		○	○	○	○	●	●	●			●	●			○	○	○	○				
[KLENK ET AL. 2015]		○	●	○	○		●	○					●		○	○	○	●		○		
[LIEB 2017]		○	●	○	○		●															
Software	[DREHER ET AL. 2009]		○	○	○		●						●	●		○						
	[EGER, NÜRNBERGER 2011]		○				●	○														
	[INFORM 2013]		●	●	○	○	●	●				○	○				○	○		○		
	[WUSTMANN 2014]		○	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●		○	○	○	○	○		
	[ALMERT 2015]		●	●			●	●							●							
[GÜNTHER, KEUNTE 2016]		●	●		○	○	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●		

Abbildung 1: Vergleich bestehender Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen (Benennung der Quellen in Martini 2017)

2.1 Bewertungsmodell

Als Grundlage der Berechnung müssen die Daten des jeweiligen Routenzugsystems in das Simulationstool eingegeben werden. Hierzu sind zunächst die gewählten bzw. gegebenen Gestaltungsalternativen analog zu den Morphologie-Darstellungen in der VDI 5586 Blatt 1 (2016a) zu erfassen. Anschließend sind Eingangsparameter wie Systemelemente (z. B. Transportgut, Route), Systemprozesse (z. B. Beladung, Fahrt) und weitere Eingabeparameter (z. B. Arbeitszeit, Wiederbeschaffungszeiten) einzugeben.

Um auch den Ressourcenbedarf des Routenzugsystems bestimmen zu können, ist es notwendig, eine Dimensionierung vorzunehmen. Dies erfolgt innerhalb des Bewertungsmodells automatisch. Methodisch wird dabei auf die in der VDI 5586 Blatt 2 (2016) beschriebene Vorgehensweise zurückgegriffen.

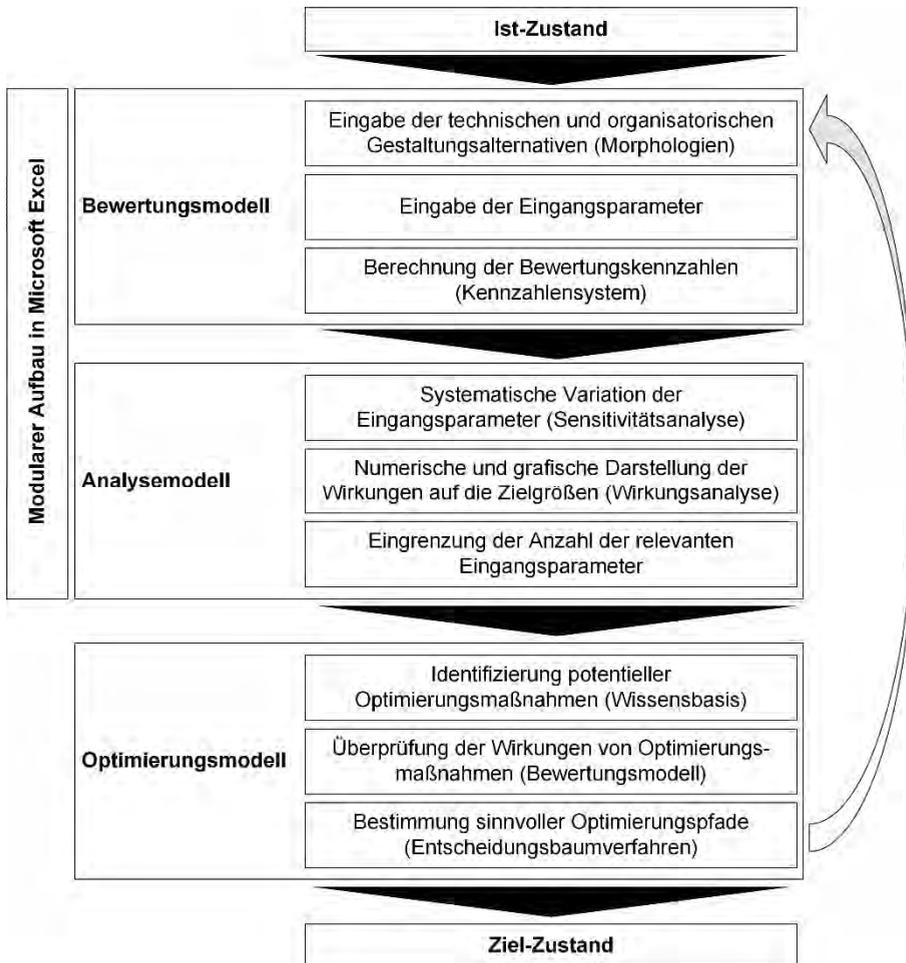


Abbildung 2: Lösungsansatz für die Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen

Insgesamt werden im Bewertungsmodell fünf Strukturkennzahlen, 48 Kennzahlen zur Logistikleistung, 35 Wirtschaftlichkeits- und elf Qualitätskennzahlen bestimmt und dokumentiert. Diese Kennzahlen dienen im Zuge der Analyse als Zielgrößen, deren Veränderungen bei der Variation von Eingangsparameterwerten erfasst werden. Des Weiteren fungieren sie als vom Anwender auswählbare Bewertungskriterien bei der Beurteilung der Güte von Systemzuständen im Zuge der Optimierung.

2.2 Analysemodell

Das Analysemodell ist unmittelbar an das Bewertungsmodell angebunden. Die in das Bewertungsmodell eingegebenen und/oder berechneten Größen – und somit der geplante oder aktuelle Betriebszustand des Routenzugsystems – dienen als Ausgangswerte der Simulationsläufe im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. In deren Verlauf werden die Eingangsparameterwerte schrittweise im Rahmen einer vorab vom Anwender zu definierenden Spannweite variiert. So wird beispielsweise bei der Untersuchung der Fahrgeschwindigkeit eine Variation in Schritten von 0,1 m/s in einem Intervall von 0,5 bis 2,0 m/s vorgenommen (Tab. 1).

Table 1: Auszug des Test-Designs zur Variation von Eingangsparameterwerten

Eingangsparameter	Einheit	Min-Wert	Ist-Wert	Max-Wert	Schrittweite
Fahrgeschwindigkeit	[m/s]	0,5	1,5	2,0	0,1
Routenlänge	[m]	250	500	750	50
Durchsatz je Bereitstellort	[KLT/h]*	1	5	10	1
Anzahl Anhänger je Fahrzeug	[Stk]	2	4	6	1
...

* KLT = Kleinladungsträger

Ein analoges Beispiel zeigt Abbildung 3, die die Resultate der Variation der Puffergröße am Bereitstellort hinsichtlich von neun Zielgrößen als Liniendiagramme darstellt. Die Kostengrößen verzeichnen erwartungsgemäß mit zunehmender Puffergröße einen degressiven Verlauf. Die Wiederbeschaffungs-, die Zykluszeit wie auch der kapazitive Nutzungsgrad (mittlere Beladung) dagegen steigen. Die Anzahl der erforderlichen Umläufe sinkt zunächst stark. Der Effekt ist so stark, dass, obwohl ein Routenzug weniger benötigt wird, der zeitliche Nutzungsgrad sinkt. Bei einer Puffergröße von vier KLT je Bereitstellort hat der Effekt bereits so stark abgenommen, dass die Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Routenzüge auf einen voll auf die zeitliche Nutzung durchschlägt und diese sprunghaft ansteigt.

Aus den Kurvenverläufen wird deutlich, dass ein Parameter, je nach Betriebspunkt, hoch wirksam oder auch von nachrangiger Bedeutung sein kann. Bezogen auf den betrachteten Einzelfall kann die Wirksamkeit einer Parameterwertveränderung sehr wohl bestimmt werden und dient als Grundlage für das weitere Vorgehen.

Insgesamt werden auf diese Weise 47 Eingangsparameterwerte variiert und 517 Systemkonfigurationen im Excel-Tool simuliert. Dies erfolgt „ceteris paribus“ („unter sonst gleichen Bedingungen“), weil dadurch die Änderungen der Zielgrößen auf die

Variation lediglich eines Eingangsparameterwerts zurückzuführen sind (Ursache-Wirkungs-Zusammenhang) (Martini et al. 2015). Das Excel-Tool benötigt für einen dieser Simulationsläufe ca. zwei Minuten (CPU: Intel Core 2 Duo E8400 mit 3,0 GHz Taktfrequenz; RAM: 4 GB). Im nächsten Schritt, der Wirkungsanalyse, erfolgt eine Aggregation der 1:1-Beziehungen zwischen der Variation eines Eingangsparameterwerts und einer Zielgrößenveränderung zu den Wirkungen aller Eingangsparameter auf aggregierte Zielbündel wie beispielsweise Betriebskosten. Hierdurch wird es möglich, Wirksamkeitsrangfolgen von Gestaltungsalternativen und Eingangsparametern zu bilden und so die für die Optimierung wichtigen Größen identifizieren und die unbedeutenden ausschließen zu können.

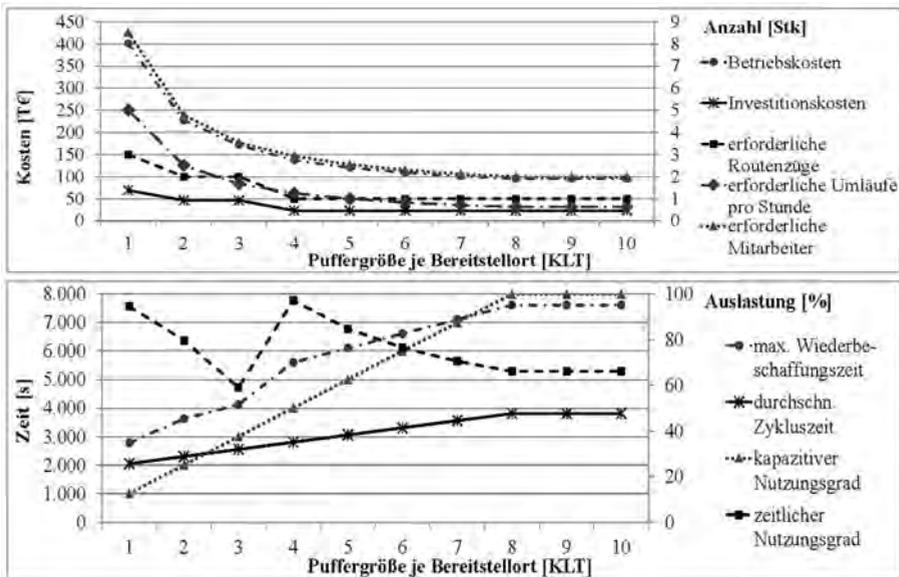


Abbildung 3: Simulationsergebnis bei Variation der Puffergröße je Bereitstellort für einen KLT-Prozess

2.3 Optimierungsmodell

Eine Wissensbasis bietet geeignete Maßnahmen zur Ergebnisverbesserung für die im Analysemodell als aussichtsreich identifizierten Eingangsparameter an. Ist beispielsweise die Fahrgeschwindigkeit als wirksamer Eingangsparameter bestimmt worden, so enthält die Datenbasis eine Übersicht möglicher Maßnahmen zur Umsetzung der höheren Geschwindigkeit wie zum Beispiel höhere Fahrleistungen der Fahrzeugtechnik, breitere Fahrwege, Vermeidung von Kurven und Kreuzungen und Ähnliches. Bereits vor der Realisierung ist der zu erzielende Effekt aus der Wirkungsanalyse ablesbar, und es lässt sich eine Hilfestellung bei der Investitionsentscheidung gewinnen. Zur Herbeiführung der Vergleichbarkeit zwischen alternativen Routenzugvarianten mit ihren multidimensionalen Bewertungskriterien findet eine Nutzwertanalyse mit individuellen Wertfunktionen im Sinne der multiattributiven Nutzentheorie Anwendung (Keeney und Raiffa 1993). Anschließend wird anhand eines Entscheidungsbaumverfahrens (Zimmermann und Stache 2001) durch

geeignete Variantenwahl ein Schritt auf dem Pfad durch den Lösungsraum bestimmt. Damit ist die erste Iteration abgeschlossen. Das Verfahren wird fortgesetzt, bis eine gewünschte Verbesserung der Zielgrößen erreicht ist oder eine bestimmte Zahl von Iterationen ausgeführt wurde.

3 Fazit

Das Verfahren bietet eine systematische Vorgehensweise geplante oder bestehende Routenzugsysteme mittels Kennzahlen umfassend zu bewerten. Durch die nach dem Einsatzzweck individuell wählbaren Kennzahlen ist eine zielgerichtete Optimierung realisierbar. Der Anwender kann gezielt Maßnahmen identifizieren und diese hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit beurteilen. Die Methode ermöglicht die anwendungsorientierte Optimierung von Routenzugsystemen unter Berücksichtigung individueller Ziele auch ohne Kenntnisse im Bereich des OR. Der Vergleich mit ausgewählter Literatur sowie zwei Software-Tools aus dem Bereich Produktionstechnik verdeutlicht, dass die Methode die in der Regel nur ansatzweise betrachtete Optimierung abdeckt und damit die eingangs dargelegte Forschungslücke schließt (Abb. 4).

	Funktion					Transport- bedarf	Verfahren														
	Gestaltung	Dimensionierung	Disposition	Bewertung	Optimierung		konstant	variabel	Empfehlung	Wissensbasis	Berechnungsvorschrift	Exakter Algorithmus	Heuristik	Graphentheoretisches Verfahren	Naturanaloges Verfahren	Simulation	Kriterienkatalog	Kennzahlen	Sensitivitätsanalyse	Multikriterielle Bewertung	Investitionsrechnung
Legende:																					
○ ansatzweise behandelt																					
● behandelt																					
[BRUNGS 2012]	●	●		○		●		●	●	●	●						○	○			
[DROSTE 2013]	●	●		○	○	●		●	●	●	●						○	○	○		
[WUSTMANN 2014] (Software)	○	●		○	○	●		●	●	●	●	●	●				○	●	○	○	○
[VDI 2016b] & [VDI 2016c]	●	●		○	●	●		●	●	●	●	●	●					●	●	●	●
[GÜNTNER, KEUNTJE 2016] (Software)	●	●		○	●	●		●	●	●	●	●	●				●	●	●	●	●
[MARTINI 2017]	●	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●					●	●	●	○

Abbildung 4: Vergleich der vorliegenden Arbeit mit ausgewählter Literatur und Software aus dem Bereich Produktionstechnik

Mit Blick auf die Identifizierung von Wirkungen im Rahmen der Analyse ist die Variation mehrerer Eingangsparameterwerte des Modells anzustreben. Die vollständige Untersuchung erscheint allerdings aufgrund der Vielzahl möglicher Systemkonfigurationen nicht praktikabel. Das entwickelte Excel-Tool benötigt beispielsweise für die vollständige Berechnung der Kombinationsmöglichkeiten aus lediglich zwei Eingangsparametern bereits mehrere Stunden. Vor diesem Hintergrund erscheinen die Ansätze der statistischen Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments (DoE)) als vielversprechend, weil lediglich eine begrenzte Anzahl der Systemkonfigurationen systematisch untersucht wird (Siebertz et al. 2010).

Ein Ansatzpunkt für die zukünftige Weiterentwicklung des Verfahrens liegt in der weitergehenden Automatisierung in den Bereichen der Auswahl und Implementierung von Verbesserungsoptionen. Aussichtsreiche Ansätze dazu finden sich in der Literatur im Gebiet der Agentensysteme (Ellinger 2016).

Weiteres Potenzial findet sich in der Verwendung dynamischer Dispositionsverfahren. Eine erfolgreiche Umsetzung hätte weitreichende Auswirkungen und müsste bereits bei der Gestaltung und Dimensionierung berücksichtigt werden. Auch hier finden sich erste erfolgversprechende Ansätze in artverwandten Feldern (Mirlach et al. 2013).

Literatur

- Ellinger, M.: Beitrag zur agentenbasierten Konzeptplanung von Kommissioniersystemen. In: ten Hompel, M. (Hrsg.): Logistik für die Praxis., Dortmund: Praxiswissen 2015.
- Keeney, R.; Raiffa, H.: Decisions with multiple objectives - Preferences and value tradeoffs. New York: Cambridge University Press 1993.
- Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.
- Martini, A.: Anwendungsorientierte und modellgestützte Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen. Dissertation (Promotionsverfahren eröffnet). Siegen: Universität Siegen 2017.
- Martini, A.; Rohe, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Einflussfaktoren in Routenzugsystemen. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 1/2, S. 65-71.
- Martini, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Planung von Routenzugsystemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 1-2, S. 50-55.
- Mirlach, M.; Günthner, W.; Ulbrich, A.; Beckhaus, K.: Auftragszuteilungsverfahren für Staplerleitsysteme. VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.): 17. Flurfördertagung – VDI-Berichte Nr. 2201, 2013, S. 67-68.
- Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE). Heidelberg: Springer 2010.
- VDI 5586 Blatt 1: Routenzugsysteme – Grundlagen, Gestaltung und Praxisbeispiele. Berlin: Beuth- 2016.
- VDI 5586 Blatt 2: Routenzugsysteme – Planung und Dimensionierung. Berlin: Beuth- 2016.
- Zimmermann, W.; Stache, U.: Operations Research - Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung. 10. Aufl., München: Oldenbourg 2001.

Simulationsbasierte Bewertung von intralogistischen Prozessen am Beispiel der Warenbereitstellung im Einzelhandel

Simulation-based Evaluation of Intralogistics Processes Exemplified by the Shelf Replenishment of Retailers

Jens Heger, Stefan Koch, Thomas Voss, Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg
(Germany), jens.heger@leuphana.de, stefan.koch@leuphana.de,
thomas.voss@leuphana.de

Abstract: This study analyses two different shelf replenishment methods for a leading German drugstore chain and proposes a conversion from the commodity group-based shelf replenishment approach towards a shelf replenishment process based on sales data. For that the sales data of a sample retailer was collected for one quarter and analysed to determine a suitable commodity group for the simulation project. In a next step, the shelf space and the demand distribution for 106 SKUs was determined and provided the input for the simulation model to determine potential benefits of a sales data-based shelf replenishment process. We were able to show that a shelf replenishment process based on sales data provides ample opportunity for retailers to improve one of their most costly business processes.

1 Einleitung und Problemstellung

Die in dieser Studie betrachtete Problemstellung stammt aus der Supply Chain eines führenden deutschen Drogeriekonzerns. Dabei liegt der Fokus der Untersuchung auf den filialinternen Prozessen der Materialbereitstellung, welche maßgeblich die Warenverfügbarkeit in Form von On-Shelf Availability (OSA) beeinflusst. Ist die vom Endkunden gewünschte Stock Keeping Unit (SKU) nicht im Regal verfügbar, kommt es zu einer Out-of-Shelf (OOSH)-Situation, einem teuren und nach wie vor ungelösten Problem im Einzelhandel (Chuang et al. 2016). Da im wettbewerbsintensiven Einzelhandel das Auftreten einer OOSH in über 41 Prozent der Fälle zum Verlust des Endkunden an die Konkurrenz führen kann (Helm et al. 2013), erscheint es auf den ersten Blick sinnvoll, einen hohen Lagerbestand in der jeweiligen Filiale vorzuhalten, um möglichen Bestandslücken begegnen zu können. Dies erhöht jedoch gleichzeitig die Komplexität der intralogistischen Prozesse des Einzelhändlers, insbesondere in der Warenverräumung (Ton und Raman 2010). So sind bis zu 70 Prozent der Arbeitszeit eines Filialmitarbeiters Verräumprozessen zuzuordnen

(Läubli et al. 2015), und diese sind für 45 bis 48 Prozent der Logistikkosten im Einzelhandel verantwortlich (van Zelst et al. 2009; Kuhn und Sternbeck 2013).

Trotz des hohen Ressourceneinsatzes sind durchschnittlich 8,3 Prozent der SKUs OOSH (Gruen und Corsten 2008; Ehrental und Stölzle 2013), ohne dabei jedoch zwangsläufig Out-of-Stock (OOS) zu sein. Ton und Raman (2010) betonen in diesem Zusammenhang, dass 25 bis 30 Prozent der OOSHs im Lebensmittel-einzelhandel nicht OOS sind, sondern Endkunden lediglich keinen Zugriff auf die gewünschten SKUs haben. Der Auffüllprozess der Regale (Shelf Replenishment) aus dem Pufferlager (Backroom) der Filiale wurde in diesem Zusammenhang als ein wesentlicher Grund für das Auftreten der OOSHs identifiziert (McKinnon et al. 2007). Das Pufferlager wird dabei als Überlauflager für all jene SKUs verwendet, welche nicht in das Verkaufsregal verräumt werden können. Dabei spielen sowohl die Anlieferzyklen und die Größe der meist vom Hersteller bestimmten Case Packs als auch marketingtechnische Aspekte eine Rolle. Da Regalfläche teuer und knapp ist, erlaubt es das Pufferlager, eine größere Vielfalt an SKUs in den Regalen zu präsentieren und damit zu einer Steigerung des Absatzes beizutragen (Eroglu et al. 2013). Dies stellt die Intralogistik einer Filiale jedoch vor die Herausforderung, die Verkaufsregale aus dem Pufferlager so mit SKUs zu versorgen, dass idealerweise keine OOSHs auftreten. Moussaoui et al. (2016) zeigen in diesem Zusammenhang, dass mit abnehmender Frequenz des Shelf Replenishment (SR)-Prozesses die OOSHs zunehmen, was jedoch auch mit der Qualität der Umsetzung des SR-Prozesses erklärt werden kann (Eroglu et al. 2013).

Aktuell werden die untersuchten Filialen zweimal wöchentlich regulär mit Ware aus dem Zentral- und Regionallager beliefert. Die Ware wird auf Rollboxen (RoBo) angeliefert, deren Sortierung an den Anforderungen der Lager- und Distributionslogistik ausgerichtet ist und entsprechend nicht warengruppenrein erfolgt. Vielmehr nehmen Aspekte wie Gewicht, Belastbarkeit oder anderweitige Auflagen Einfluss auf die Zusammenstellung der jeweiligen RoBos. Die angelieferten RoBos werden dann am Folgetag vor Ladenöffnung in die Filiale gefahren, um den SR-Prozess auszuführen. SKUs die nicht in das Regal verräumt werden können, werden in einem nächsten Schritt nach Warengruppe in Rollwagen (RoWa) verräumt. Die RoWas werden dann für die folgenden SR-Prozesse – das Wiederauffüllen der Regale aus dem Pufferlager – verwendet. Diese SR-Prozesse erfolgen dann nach Warengruppen. Die Regale in den Filialen sind ebenfalls nach Warengruppen angeordnet, der Filialmitarbeiter fährt einen (oder mehrere) RoWa einer Warengruppe vor die entsprechende Regalfläche und führt den SR-Prozess dann durch. Dabei versucht er so viele SKUs wie möglich aus dem RoWa in die Regale zu verräumen – unabhängig von der individuellen Verkaufsfrequenz bzw. der noch bestehenden Regalreichweite. Nach Auffassung der Autoren kann diese SR-Strategie das Auftreten von OOSHs trotz hohem Personaleinsatz erklären – Filialmitarbeiter sind beschäftigt, aber nicht mit den richtigen SKUs. Es soll im Rahmen dieser Studie daher gezeigt werden, dass durch eine Anpassung des SR-Prozesses die Auffüllfrequenz für einige SKUs reduziert werden kann, ohne dass es dabei zu einer Zunahme von OOSHs kommen muss. Vielmehr kann durch eine Clusterung der SKUs nach deren Verkaufsfrequenz anstatt nach deren Warengruppenzugehörigkeit erreicht werden, dass schnelldrehende SKUs häufiger aufgefüllt werden – teilweise sogar öfter als im bisherigen SR-Prozess – dafür

jedoch langsamdrehende SKUs seltener in den SR-Prozess aufgenommen werden müssen.

Die bisherige SR-Strategie hat den Vorteil, dass für den Filialmitarbeiter die Zuordnung der RoWa zu den entsprechenden Regalen leicht nachvollziehbar ist. Gleichzeitig durchlaufen dabei SKUs den SR-Prozess, obwohl dafür noch keine Notwendigkeit besteht. Wenngleich aus marketingtechnischen Gründen beispielsweise die Forderung besteht, einen – vom jeweiligen Unternehmen definierten – Regalbestand vorzuhalten, so sind es gerade die wechselnden Anforderungen der Marketing- bzw. der Vertriebsabteilung, welche einen dynamischen statt einen fixen SR-Prozesses sinnvoll erscheinen lassen.

2 Vorbereitung der Simulationsstudie

Im Rahmen einer Vorstudie werden fünf Filialen des Kooperationsunternehmens besucht und deren Verräumprozesse analysiert. Dabei wird überprüft, ob der SR-Prozess in den einzelnen Filialen unterschiedlich umgesetzt wird, was nicht der Fall ist. In einem nächsten Schritt wird die exemplarische Testfiliale für die Studie ausgewählt, welche die höchste Anzahl an SR-Prozessen aufweist. Die Kassendaten eines Quartals dieser Filiale werden dann auf Tagesbasis ausgewertet, um die Absatzzahlen für jede SKU aller Warengruppen zu bestimmen. Dabei werden die Daten um SKUs bereinigt, welche im Betrachtungszeitraum beworben oder aus dem Sortiment genommen worden sind. Auf Basis der bereinigten Daten kann in einem Folgeschritt die Warengruppe bestimmt werden, welche aufgrund ihrer Zusammensetzung aus sowohl Schnell-, Mittel- als auch Langsamdrehern das Gesamtsortiment sehr gut nachbildet. Da die Regalkapazitäten innerhalb einer Warengruppe bekannterweise aufgrund von marketing- bzw. vertriebstechnischen Aspekten (Eroglu et al. 2013) unterschiedlich groß definiert sind, muss in einem nächsten Schritt die Regalkapazität für jede der 106 untersuchten SKUs manuell erfasst werden. In Tabelle 1 sind ausschnittsweise die Regalkapazitäten für die einzelnen SKUs anonymisiert aufgeführt:

Tabelle 1: Regalkapazitäten (Ausschnitt)

Produkt	Regalkapazität
P1	10
P2	10
P3	10
P4	14
P5	6
...	...
P102	18
P103	18
P104	30
P105	22
P106	22

Daraufhin wird die mittlere Regalreichweite (in Tagen) für jede einzelne SKU auf Basis der durchschnittlichen Endkundennachfrage bestimmt, um einen ersten Grobübersicht über das mögliche Verbesserungspotenzial des SR-Prozesses zu erhalten (siehe Abb. 1).

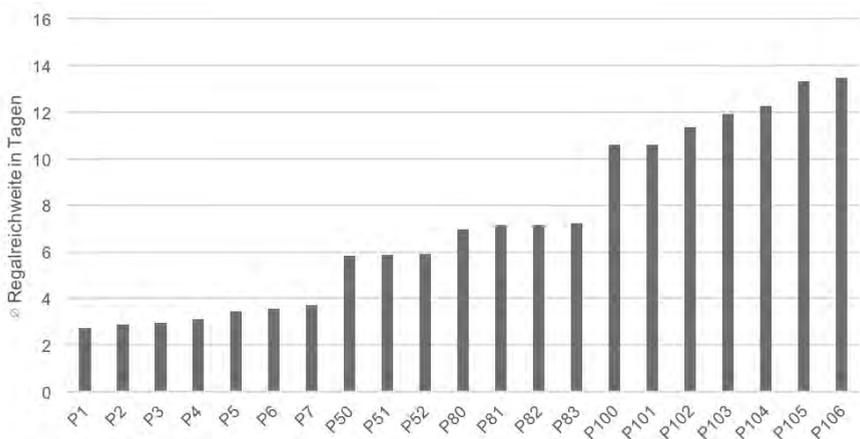


Abbildung 1: Mittlere Regalreichweite in Tagen (Ausschnitt)

Bereits hier wird deutlich, dass eine Sortierung nach Warengruppe nicht sinnvoll sein kann und daher das Potenzial einer Sortierung nach Verkaufsfrequenz näher untersucht werden muss.

3 Aufbau und Durchführung der Simulationsstudie

Basierend auf den Kassendaten der betrachteten SKUs werden für jede einzelne SKU Verteilungen bestimmt, um deren Nachfrage simulieren zu können. Die Bestimmung der Verteilungen und die Signifikanzberechnung (Chi-Squared Test) werden mithilfe der Software Stat::fit der Geer Mountain Software Corp. durchgeführt. Die Simulation beziehungsweise das Ziehen der Stichproben wird mit MATLAB von MathWorks erstellt. Es stellt sich heraus, dass die negative Binomialverteilung, die unter anderem in der Versicherungsmathematik für Schadensfälle eingesetzt wird, die Abrufe sehr gut abbildet. Die in diesem Zusammenhang häufig eingesetzte Poissonverteilung (Eley 2012) führt bei fast allen SKUs zu schlechteren Ergebnissen. Die Parameter der negativen Binomialverteilung unterscheiden sich dabei für alle SKUs. Für alle ermittelten Verteilungen wird ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt, der bei 95 Prozent Signifikanzniveau jeweils bestanden wird.

Da die Verteilungen auf Basis der Kassendaten erfolgen, werden mögliche OOSH-Situationen, die gegebenenfalls aufgetreten sind, nicht abgebildet, da sie nicht bekannt sind. Es wird also ein Nachfrageverhalten angenommen, das erfüllt werden kann, was die Relevanz eines verkaufsfrequenzbasierten SR-Prozesses nochmals zusätzlich unterstreicht.

In der Simulationsstudie wird das Nachfrageverhalten aller ausgewählten SKUs über den Zeitraum eines Jahres (~310 Verkaufstage) betrachtet. Da die Reichweite der SKUs in der Regel wenige Tage betrifft, ist die Simulationszeit eines Jahres ausreichend, um eine belastbare Aussage treffen zu können. Die Einschwingphase ist nach dem ersten vollständigen Wiederauffüllen nach wenigen Tagen abgeschlossen, daher ist die Simulationszeit eines Jahres für die Bestimmung entsprechender Kennzahlen eine sinnvolle Wahl. Zusammen mit der ermittelten Regalkapazität lässt sich bestimmen, welche Nachfüllstrategie bzw. Nachfüllfrequenz für jede einzelne SKU notwendig ist, sodass es zu keiner durch die Strategie verursachten OOSH-Situation kommt. Die notwendige Nachfüllfrequenz wird tageweise berechnet. In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass 14 der 106 SKUs täglich nachgefüllt werden müssen. Bei jeweils elf SKUs reicht ein zwei- bzw. dreitägiger Rhythmus aus.

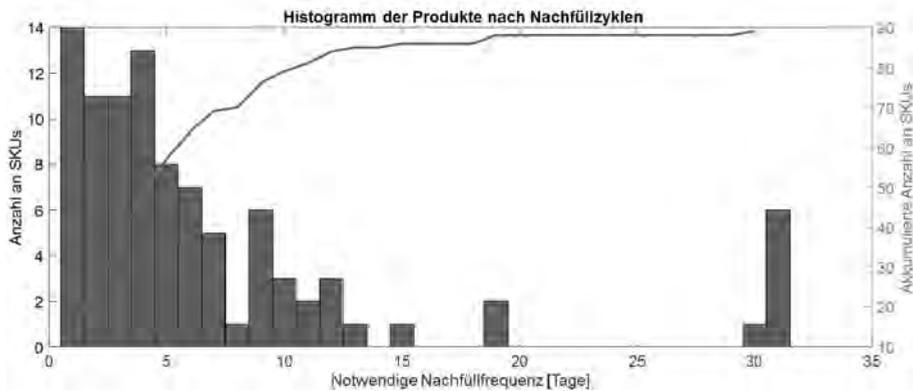


Abbildung 2: Anzahl der SKUs und deren Nachfüllfrequenz

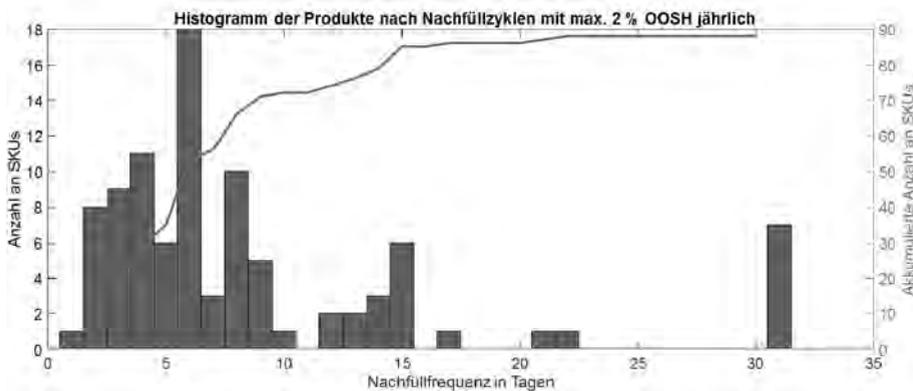


Abbildung 3: Anzahl der SKUs und deren Nachfüllfrequenz (bei maximal 2 Prozent OOSH)

Grundsätzlich steht das Risiko eine SKU nicht im Regal zu haben, dem Sicherheitspuffer oder in diesem Fall der häufigen Nachräumung gegenüber. Daher wird in einer zweiten Simulation angenommen, dass maximal zwei Prozent der Nachfrage an eine SKU innerhalb des betrachteten Jahres unbefriedigt bleiben dürfen. Dies führt zu deutlich geringeren Nachfüllfrequenzen, wie Abbildung 3 zeigt. Nur eine SKU müsste demnach täglich aufgefüllt werden und acht bzw. neun SKUs müssten zwei- bzw. dreitäglich eingeräumt werden.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen, dass nur einige wenige SKUs (< 20 Prozent) täglich nachgefüllt werden müssen. In Abbildung 4 ist eine Clustering nach Nachfüllfrequenzen dargestellt. Eine Sortierung der SKUs nach Verkaufsfrequenz unter Betrachtung der Regalkapazität würde dazu führen, dass weniger als 40 Prozent der RoWa im Mittel täglich bewegt werden müssten. In der Grafik ist ein Sockel an täglichen SKUs erkennbar, der dann im jeweiligen Rhythmus ergänzt wird. An den verschiedenen Tagen kommen die entsprechenden SKUs hinzu. Man könnte eine RoWa-Aufteilung direkt nach diesem Muster durchführen, sollte es zu wenig Produkte mit bestimmter Frequenz geben. Dann können SKUs zusammengefasst werden.

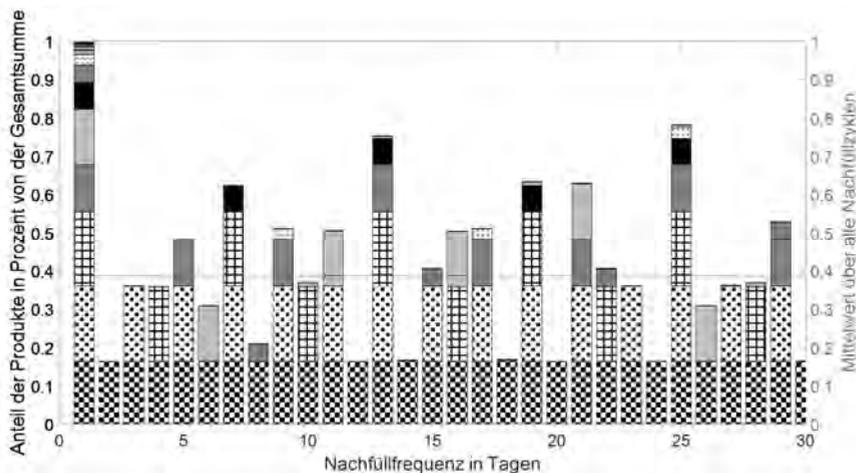


Abbildung 4: SKU-Clusterbewegungen pro Tag ohne Auftreten von OOSHs

Wird von einer anderen Sortierung der RoWas ausgegangen, ist es in der Praxis häufig nötig, sämtliche Wagen zu bewegen. Hinzu kommt, dass Regale aufgefüllt werden, die noch genug Produkte enthalten. Hier ist ein effektiveres Vorgehen möglich.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Nachfüllstrategie noch effizienter zu gestalten, wenn bis zu zwei Prozent OOSH-Situationen zugelassen würden. Dann sinkt die benötigte Frequenz deutlich. Wie Abbildung 5 zeigt, müssen nur etwas mehr als 20 Prozent der SKUs im Mittel täglich nachgefüllt werden.

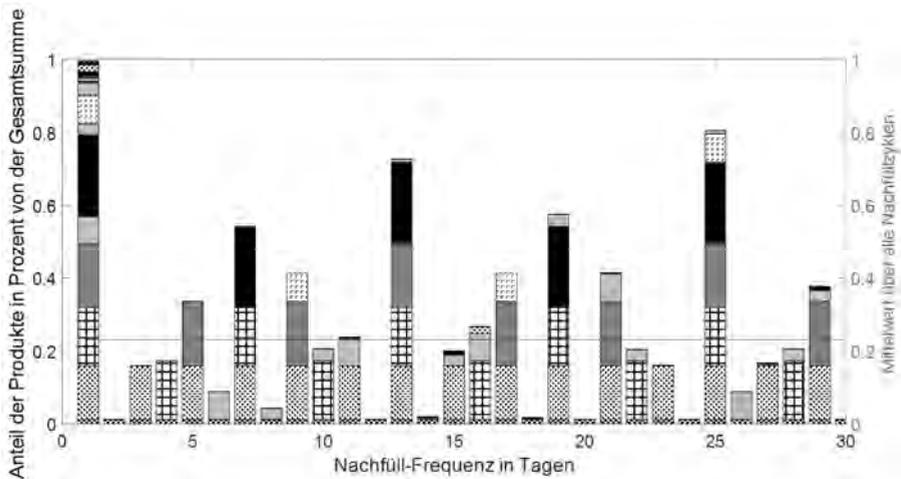


Abbildung 5: SKU-Clusterbewegungen pro Tag bei maximal 2 Prozent OOSH

Unterschiedliche Strategien zur Vermeidung von zusätzlichen OOSH-Situationen sollten mit diesem Ansatz jedoch unbedingt kombiniert werden. Einerseits können mithilfe der vorgestellten Simulation Sensitivitätsanalysen der Regalkapazitäten durchgeführt werden, um beispielsweise durch eine geringe Veränderung der Kapazitäten eine neue Gruppenzuordnung einzelner SKUs zu erreichen. So kann etwa eine stärker nachgefragte SKU auf Kosten einer weniger nachgefragten SKU geringfügig mehr Regalfläche erhalten, vorausgesetzt, dass dies im Einklang mit anderen Anforderungen geschieht.

Weiterhin kann es sinnvoll sein, die Auffüllreihenfolge innerhalb eines Tages so zu wählen, dass sich innerhalb eines Tages eine höhere bzw. niedrigere SR-Frequenz ergeben würde. Hierbei könnte beispielsweise auch auf die innertägliche Saisonalität von SKUs filialspezifisch eingegangen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Simulationsstudie konnte beispielhaft gezeigt werden, welches Verbesserungspotenzial eine Anpassung des SR-Prozesses von einer warengruppen- zu einer verkaufsfrequenzbasierten Warenbereitstellung birgt. Gerade vor dem Hintergrund einer zunehmenden Digitalisierung der intralogistischen Prozesse ist eine warengruppenbasierte Warenbereitstellung überholt. Vielmehr muss es Ziel sein, die in Kommissionier- und Verteilzentren hinlänglich bekannten und praktizierten Ansätze auf die Letzte-Meter-Logistik in der Filiale zu übertragen. Die Vorteile des warengruppenbasierten SR-Prozesses, beispielsweise die einfache Zuordnung des RoWa zur Regalfläche, können längst technisch besser abgebildet werden. Darüber hinaus erlaubt die verkaufsfrequenzbasierte Warenbereitstellung die Arbeitszeit des Filialmitarbeiters deutlich effizienter zu nutzen.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei dem Team für Vertriebsprojekte ihres Praxispartners für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

Literatur

- Chuang, H.; Oliva, R.; Liu, S.: On-Shelf Availability, Retail Performance, and External Audits. A Field Experiment. *Production and Operations Management* 25 (2016) 5, S. 935–951.
- Ehrenthal, J.; Stölzle, W.: An Examination of the Causes for Retail Stockouts. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 43 (2013) 1, S. 54–69.
- Eley, M.: *Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges Plant Simulation*. Berlin: Springer Gabler 2012.
- Eroglu, C.; Williams, B.; Waller, M.: The Backroom Effect in Retail Operations. *Production and Operations Management* 22 (2013) 4, S. 915–923.
- Geer Mountain Software Corp.: Stat::fit. Verfügbar unter: <http://www.geerms.com/>.
- Gruen, T.; Corsten, D.: A Comprehensive Guide to Retail Out-of-Stock Reduction in the Fast-Moving Consumer Goods Industry. (2007). <http://itsoutofstock.com/wp-content/uploads/2013/04/OOS-Guide-2008-Revision.pdf>. Letzter Zugriff am 15.07.17.
- Helm, R.; Hegenbart, T.; Endres, H.: Explaining Customer Reactions to Real Stockouts. *Review of Managerial Science* 7 (2013) 3, S. 223–246.
- Kuhn, H.; Sternbeck, M.: Integrative Retail Logistics. An Exploratory Study. *Operations Management Research* 6 (2013) 1, S. 2–18.
- Läubli, D.; Schlögl, G.; Silén, P.: Smarter Schedules, Better Budgets: How to Improve Store Operations. (2015). <http://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/smarter-schedules-better-budgets-how-to-improve-store-operations>. Letzter Zugriff am 07.06.17.
- MathWorks: MATLAB. <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>. Letzter Zugriff am 07.06.17.
- McKinnon, A.; Mendes, D.; Nababteh, M.: In-Store Logistics. An Analysis of On-Shelf Availability and Stockout Responses for Three Product Groups. *International Journal of Logistics Research and Applications* 10 (2007), S. 251–268.
- Moussaoui, I.; Williams, B.; Hofer, C.; Aloysius, J.; Waller, M.: Drivers of Retail On-Shelf Availability. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 46 (2016) 5, S. 516–535.
- Ton, Z.; Raman, A.: The Effect of Product Variety and Inventory Levels on Retail Store Sales. A Longitudinal Study. *Production and Operations Management* 19 (2010) 5, S. 546–560.
- van Zelst, S.; van Donselaar, K.; van Woensel, T.; Broekmeulen, R.; Fransoo, J.: Logistics Drivers for Shelf Stacking in Grocery Retail Stores. Potential for Efficiency Improvement. *International Journal of Production Economics* 121 (2009) 2, S. 620–632.

Simulation von Transport- und Sortieranlagen mit Pulks

Simulation of Transport and Sorting Facilities with Bulks

Bernd Noche, Mandar Jawale, Universität Duisburg-Essen, Duisburg (Germany),
bernd.noche@uni-due.de, mandar.jawale@uni-due.de

Abstract: The following paper deals with analysis of bulk systems, such instances of bulk can be found in textile industry. These bulk systems arise due to material flow systems which are based on sequence of products or consolidated shipments that are assigned to fixed route. The effects of the bulk systems are demonstrated with help of simulation models; which are based on real time applications. The modelling references to the bulk system, along with results of simulation are presented in this paper.

1 Motivation und Problemstellung

Die Gestaltung der Fördertechnik für hängende Waren ist eine besonders herausfordernde Aufgabenstellung, da hier nicht nur der Materialfluss von einzelnen Trolleys oder Kleiderbügeln betrachtet werden muss, sondern auch Pulks dieser Objekte. Durch die Pulk-Bildungen ergeben sich dynamische Effekte, die nur mit Hilfe der Simulationstechnik bewertet werden können. Die Notwendigkeit für die Pulk-Bildung ergibt sich aus den operativen Abläufen, bei denen beispielsweise eine Ladung eines LKW vereinnahmt wird und Produktgruppen gemeinsam überprüft, behandelt und gelagert werden. Aber auch bei der Verladung kann die Ware in Pulks durch ein Materialflusssystem geroutet werden, um kurze Beladungszeiten zu gewährleisten. Innerhalb der Materialflusssysteme entstehen Pulks beispielsweise bei der Verpackung, wenn aus der Kommissionierung hängende Ware sortiert Arbeitsplätzen zugeführt werden soll.

In der Literatur ist die Simulation derartiger Systeme nur selten behandelt worden. Einzelne Problemstellungen der Planung finden sich bei der Beschreibung von Systemlösungen wie beispielsweise Roos et al. (1999) oder Irrgang (2008) sie erwähnen. Problemstellungen aus der Textilindustrie finden sich beispielsweise bei Wilson und Laney (2003), die Behandlung von Fragestellungen in Verbindung mit Sortieranlagen beschreiben u. a. Fritz et al. (2013), Turek und Marquardt (2007) sowie Clausen et al. (2015). Die VDI 3619 (2017) behandelt Sortiersysteme für

Stückgut und beschreibt Ausführungsbeispiele und exemplarisch die Planung einer Stückgutsortieranlage.

In der Patentschrift von Lux (1994) wird ein System zur Sortierung von Gütern beschrieben. Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Aufbau des Konzepts. Durch den dargestellten Aufbau lassen sich auf einfache Art und Weise große Anzahlen von Einzelstücken in einem 3- oder 4-stufigen Verfahren sortieren. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang die Beurteilung des Systemdurchsatzes derartiger Systeme in Abhängigkeit ihrer Kapazität, da durch die Größe der Sortierungssequenz sehr lange Belegungszeiten der Sortieranlage entstehen können.

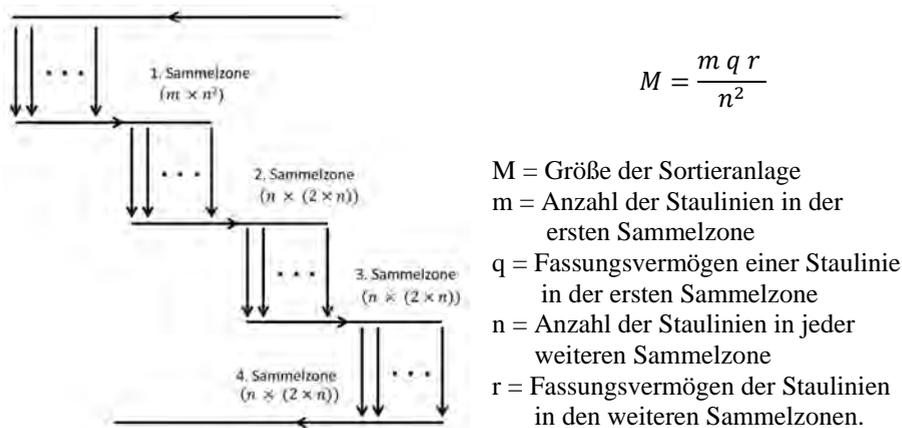


Abbildung 1: Systemkonzept einer Sortieranlage

Das Konzept ermöglicht den Entwurf verschiedener Sortieranlagen in Abhängigkeit der zu sortierenden Anzahl an Objekten. Wenn also beispielsweise $M = 500$ Objekte sortiert werden müssen, könnten in der ersten Sammelzone $m = 4$ Strecken mit einer jeweiligen Kapazität von 125 Objekten enthalten sein. Die Objekte werden hier so vorsortiert, dass in der ersten Strecke die Objekte 1 bis 125, in der zweiten die Objekte 126 bis 250, in der dritten Strecke die Objekte 251 bis 375 und in der letzten Bahn die Objekte 376 bis 500 in beliebiger Reihenfolge gespeichert werden können. Die folgenden drei Sammelstufen sortieren anschließend jede einzelne Strecke. Die Sammelstufe zwei enthält fünf Bahnen für jeweils 25 Objekte. In der dritten und vierten Sortierstufe werden dann jeweils noch fünf Strecken mit einer Kapazität von jeweils fünf Objekten benötigt. Zur zeitlichen Entkopplung der Sortierschritte können jedoch die einzelnen Strecken mit doppelter Kapazität ausgelegt werden. Allerdings könnte die Anlage auch anders konfiguriert werden. So könnten drei Strecken mit einem Fassungsvermögen von jeweils $6 * 6 * 6 = 216$ Objekten insgesamt bis zu 648 Objekte sortieren. Die folgenden Sammelstufen haben dann jeweils eine Kapazität von 216 bzw. 36 Objekten.

Eine weitere Alternative besteht in der Aufteilung der ersten Sammelstufe in acht Strecken mit einer Kapazität von $4 * 4 * 4 = 64$ Objekten. Dann lassen sich bis zu 512 Objekte sortieren.

Auf eine erste Sammelstufe könnte verzichtet werden, wenn die zu sortierende Objektanzahl in der Größenordnung von n^3 (für $n = 2, 3, \dots$) liegt. Es ergeben sich dann sortierte Pulks von 8, 27, 64 usw. Objekten.

Das dargestellte Konzept kommt bei einer Reihe von Anwendungen zum Einsatz. So können beispielsweise Sendungen, Güter oder Behälter in Distributionszentren auf einfache Art und Weise sortiert werden, um sie dann in einer vorgegeben Reihenfolge Kunden auszuliefern oder in Supermärkten in Regale einzuräumen. Die Logik kann aber auch bei der Sortierung von Briefen und Paketen genutzt werden und als Zuordnungsprinzip im Rahmen von eCommerce dienen.

Pulk-Bildungen ergeben sich jedoch auch bei anderen Anwendungen. So müssen beispielsweise in manchen Textilägern mit hängender Ware Sendungen zusammengestellt werden, die dann im Verbund ein Materialflusssystem durchlaufen.

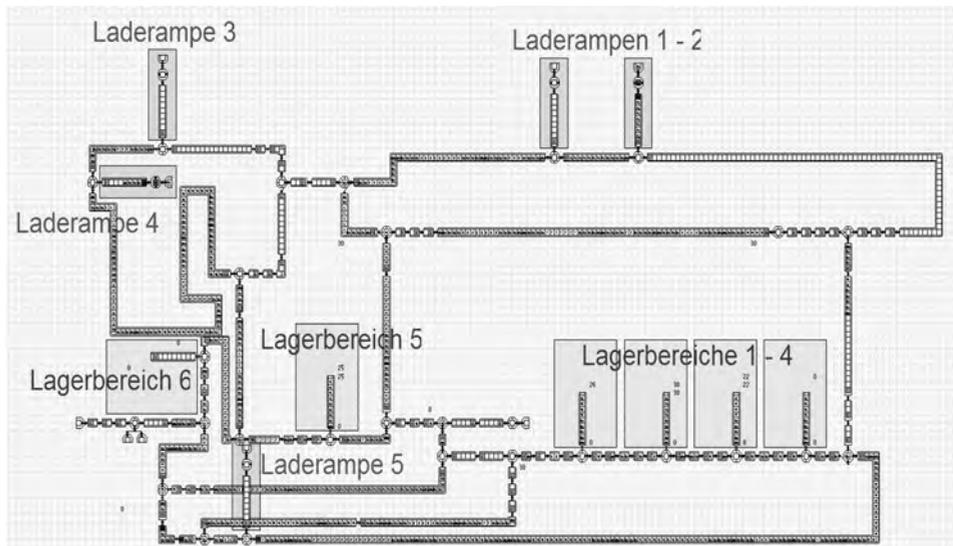


Abbildung 2: Simulations-Layout einer Fördertechnik für Trolleys

Das in Abbildung 2 dargestellte Layout eines Simulationsmodells ist die Abbildung eines Textilagers mit insgesamt sechs Lagerbühnen, die den Startpunkt für Pulks von Trolleys variabler Länge bilden. In jedem Trolley hängen, je nach Größe der Ware, eine feste Anzahl von Kleiderbügel. Diese Trolley-Pulks müssen durch das Materialflusssystem zu fünf Laderampen geschleust werden, ohne zwischendurch zu stoppen. Die Fördertechnik enthält Kreisläufe, die ein (unerwünschtes) zirkulieren ermöglicht, wenn beispielsweise die Ladestellen nicht rechtzeitig entleert werden konnten.

Bei der Simulation derartiger Anlagen ergeben sich immer wieder Fragen im Hinblick auf die Durchsatzleistung im Zusammenhang mit der Pulklänge. Es ist zu erwarten, dass mit steigender Pulklänge die Durchsatzleistung sinkt. Sie hängt auch von der Dimensionierung der Pufferstrecken im Verladebereich und von der Verladeleistung ab.

2 Simulation der Pulk-Bildung

Mit Hilfe von Simulationsmodellen können die Auswirkungen der variablen Pulklängen auf den Durchsatz und die Leistung eines Materialflusssystemes untersucht werden. Es lassen sich Kennzahlen ermitteln, die in besonderer Weise Materialflusssysteme mit Pulks charakterisieren.

Die Simulation von Trolley-Systemen ist besonders herausfordernd, da Trolleys oft in Pulks durch die Materialflusssysteme geroutet werden müssen und sehr hohe Durchsatzzahlen pro Stunde (h) erreichen. Für die Modellierung und Simulation wurde das ereignisdiskrete Simulationssystem DOSIMIS-3 verwendet, es eignet sich besonders gut für Anwendungsklassen, die hohe Durchsatzzahlen aufweisen.

Die Modellierung von Pulks stellt in ereignisdiskreten Simulationssystemen eine besondere Herausforderung dar. Üblicherweise werden bei den bausteinorientierten Systemen einzelne Objekte (Paletten, Teile etc.) durch ein Materialflusssystem bewegt. Bei der hier vorliegenden Problemklasse werden jedoch Sequenzen von Objekten, die über den gesamten Durchlauf zusammengehalten werden müssen, geroutet. An Kreuzungen und Weichen kann es dann durch eine ungeschickte Modellierung zu unerwünschten zufälligen Durchmischungen und Unterbrechungen der Pulks kommen. Bei der Modellierung ergibt sich dann die Gefahr, dass an Weichen Pulks aufeinander treffen und sich dann vereinigen, an Kreuzungen könnte es passieren, dass Pulks sich wechselseitig behindern und eine Kreuzung lange blockieren.

Ein Teilaspekt betrifft deshalb die einfache Modellierung der Steuerung von Pulks, ohne zwangsläufig auf Zähler und Pulklängeninformationen und damit auf eine aufwendige Programmierung angewiesen zu sein. Um dies zu ermöglichen, wurden Pulks gemäß Abbildung 3 gebildet.

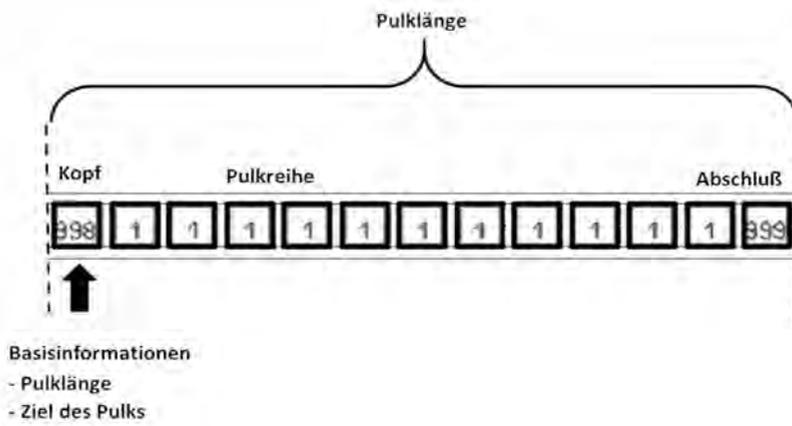


Abbildung 3: Abbildung eines Pulks

Sie bestehen im Prinzip aus einem Kopf-Objekt (hier Nr. 998), den einzelnen Gliedern des Pulks (hier im Beispiel Nr. 1) und einem Abschluss-Objekt (hier Nr. 999). Das Kopf-Objekt enthält als Minimalinformationen die Pulklänge und die Zielangabe. Mit diesen Informationen werden Weichen so geschaltet, dass sie immer

in einer festgelegten Richtung verharren. Nur Kopf-Objekte können also Weichen steuern. Ein zweites Problem ergibt sich bei der Einschleusung von Pulks in Förderkreise. Dabei wird oft gefordert, dass die Pulks, die sich im Förderkreis befinden, nicht angehalten werden dürfen. Um nun einen Pulk in einen Förderkreis einschleusen zu können, müssen Informationen zur Lücke zwischen zwei Pulks bereitgestellt werden. Die Lückeninformationen werden in der Weiche aktualisiert. Permanent wird nun die im Kopf-Objekt enthaltene Information über die Pulklänge mit der vorhandenen Lücke verglichen. Sobald die Lücke groß genug ist, darf der Pulk in den Förderkreislauf eingeschleust werden.

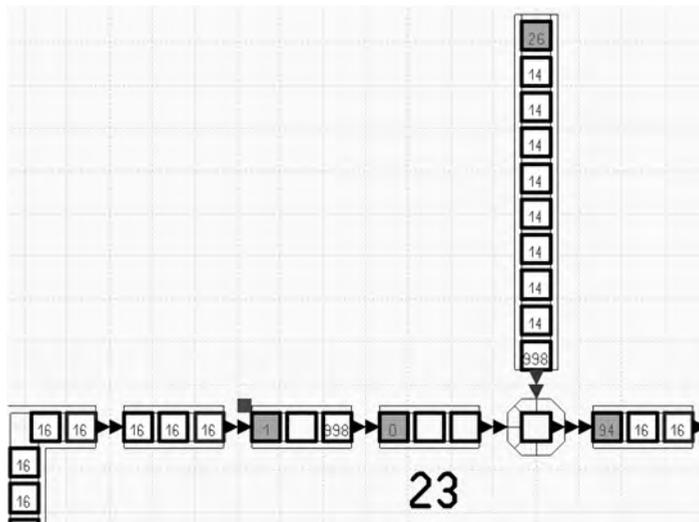


Abbildung 4: Lücke zur Einschleusung eines Pulks

In der in Abbildung 4 dargestellten Situation ist der Zusammenhang anhand von zwei Pulks dargestellt. Es soll ein Pulk (Nr. 14) in den Förderkreislauf eingeschleust werden. Der Einlauf ist blockiert, weil die Lücke zwischen den beiden Pulks mit der Kennzeichnung 16 nur noch die Einschleusung von 23 Objekten zulässt, der Pulk mit der Kennzeichnung 14 aber insgesamt eine Pulklänge von 26 Objekten aufweist. Die Nummern am Ende eines Bausteins geben den Füllstand der Förderstreckenbausteine an.

3 Simulationsuntersuchungen

Um die Auswirkungen, die Pulks auf den Durchsatz von Materialflusssystemen haben können, genauer zu untersuchen, wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt, in Anlehnung an einen Teilbereich der Anlage, die in Abbildung 2 dargestellt ist. Dargestellt ist in Abbildung 5 ein Modell mit vier Lagerbereichen. Jeder Bereich enthält einen Einschleuspunkt der Pulks in den Förderkreis. An den Förderkreis sind drei Laderampen angeschlossen. Im Modell werden Pulklängen zwischen 13 und 30 Objekten untersucht. Sollte der Puffer einer Laderampe gefüllt sein, muss ein Pulk rezirkulieren. Damit kommt er wieder an dem ursprünglichen Einschleuspunkt

vorbei. Es ist klar, dass eine Rezirkulation nach Möglichkeit vermieden werden muss, um die Einschleusung nicht zu behindern. Es ist zu erwarten, dass lange Pulks häufiger bei der Ausschleusung abgewiesen werden als kleinere Pulks. Untersucht werden soll deshalb:

1. Wie häufig erfolgen Rezirkulationen in Abhängigkeit von der Pufferlänge im Ladebereich?
2. Wie wirken sich Pulklängen auf die Systemleistung aus?

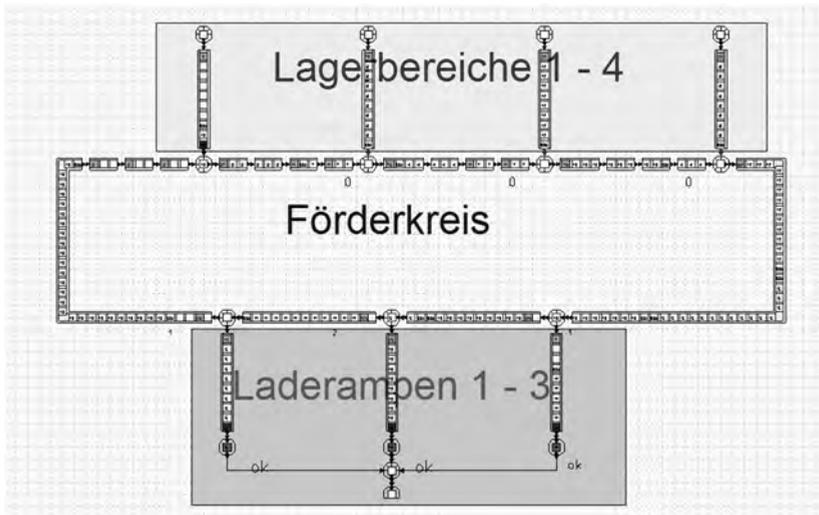


Abbildung 5: Modell zur Untersuchung von Pulksystemen

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt. In einer ersten Experimenterserie wurde die Pufferlänge vor den Laderampen variiert. Durchgeführt wurden die Analysen an Modellen, die ca. 215.000 Objekte bzw. 10.000 Pulks durchsetzen, bei einer durchschnittlichen Verladezeit von 1 s (erlang- k -verteilt mit $k = 2$) pro Trolley und einer gleichmäßigen Verteilung der Pulks auf die Lagerbereiche.

Für die Ergebnisse aus Abbildung 6 wurde im Simulationsmodell die Kapazität der Laderampe variiert. Die Variation begann mit der Kapazität der längsten Pulklänge und wurde bis zur dreifachen maximalen Pulklänge erhöht. Ermittelt wurde die prozentuale Rezirkulationsrate. Die mittlere Rezirkulationsrate ergibt sich aus dem Verhältnis von Rezirkulationen eines Pulks zu seiner Gesamtanzahl. Das heißt z. B., dass bei einer Pufferkapazität von 30 Stück die Rezirkulationsrate bei der Pulklänge von 30 Stück 200 % beträgt, somit sind diese Pulks im Durchschnitt zweimal rezirkuliert, bevor sie zur Zielstation ausgeschleust werden konnten.

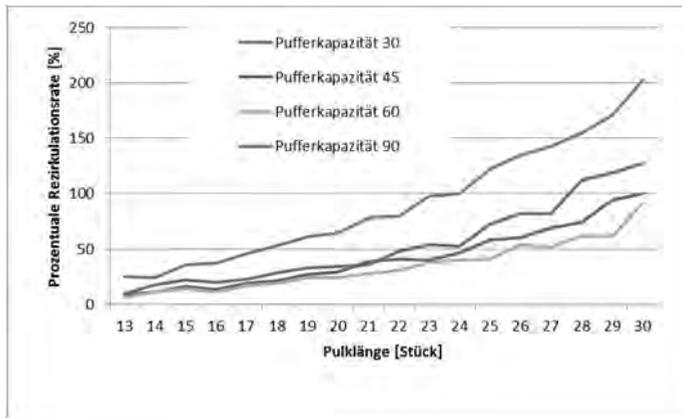


Abbildung 6: Variation der Pufferlänge an der Laderampe

Wie zu erwarten war, nimmt die Rezirkulationsrate mit der Pulklänge und mit der Verkleinerung des Puffers zu. Allerdings liegen die Werte bei einer Verdoppelung und Verdreifachung der Ausgangskapazität relativ dicht beieinander. Das heißt, dass sich die Erhöhung der Pufferkapazität um das Zweifache der maximalen Pulklänge kaum auszahlt. Bei einer Pulklänge von 13 haben – ab einer Pufferkapazität des 1,5-fachen der maximalen Pulklänge – alle Simulationsexperimente etwa die gleiche Rezirkulationsrate. In Abbildung 7 wird dieser Sachverhalt noch einmal dargestellt.

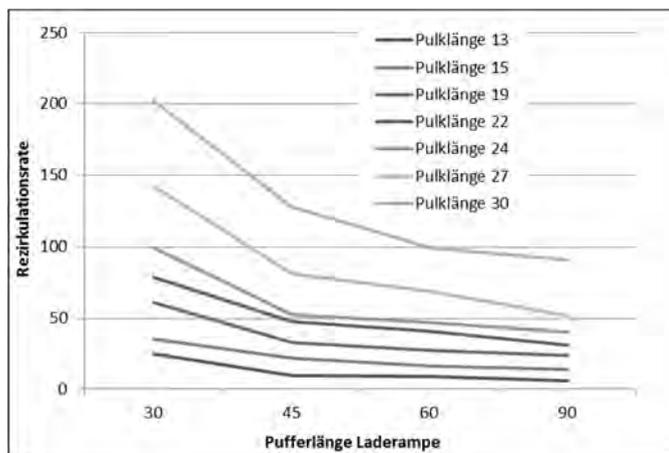


Abbildung 7: Auswirkungen der Pulklänge auf die Rezirkulationsrate

Bei einer Pufferlänge der Laderampe von 90 Objekten ist bei allen Pulklängen die Rezirkulationsrate am geringsten. Bis zu einer Pufferlänge von 45 Objekten (d. h. das 1,5-fache der maximalen Pulklänge) steigt der Anteil der kreisenden Pulks nur moderat an, insbesondere bei Pulklängen die nicht länger sind als etwa 80 % der maximalen Pulklänge.

In einer weiteren Untersuchung wurden Extremwerte untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Pulks stehen jederzeit zur Verfügung und werden sofort an der jeweiligen Weiche in die Anlage eingeschleust, sobald eine geeignete Lücke vorhanden ist.

Abbildung 8: Variation der Pulklängen

	Gesamtzeit [h]	Rezirkulation [%]	Pulkanzahl
Alle Pulklängen gleichmässig vertreten	25,3	54,1	10.000
Nur Pulklänge 13	21,5	55,4	16.540
Nur Pulklänge 30	27,8	85,0	7.170

In Simulationsläufen wurde jeweils ein Modell mit Pulklänge 13 mit einem der Pulklänge 30 bei einer Pufferkapazität der Laderampen von 45 Objekten verglichen. Zum Vergleich sind in Abbildung 8 ebenfalls Ergebnisse enthalten, wenn alle Pulklängen gleichmäßig vorkommen. Um die Ergebnisse vergleichbar zu halten, wurden jeweils ca. 215.000 Objekte durchgesetzt. Dies entspricht bei der Pulklänge 13 16.540 Pulks, bei Pulklänge 30 7.170 Pulks und bei einer idealen gleichmäßigen Durchmischung aller Pulklängen 10.000 Pulks.

Das Ergebnis zeigt, dass die Betriebsdauer (d. h. ein ununterbrochener Betrieb der Anlage) bei den extremen Pulklängen immerhin um 15 % nach unten und 10 % nach oben gegenüber einer idealen Durchmischung schwankt. Eine Pulklänge von 13 Objekten kommt einer theoretischen Minimalzeit von 19,9 h schon sehr nahe.

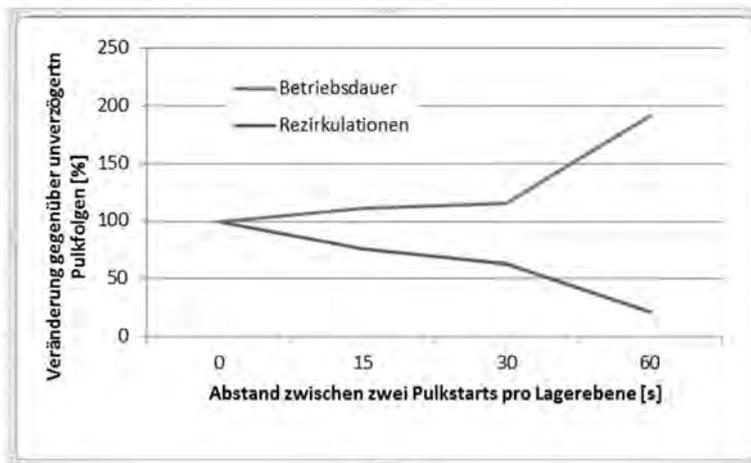


Abbildung 9: Auswirkungen des verzögerten Starts nachfolgender Pulks

Durch die Förderkreisrichtung wird vorgegeben, dass Lagerbereiche, die in Flussrichtung weiter hinten liegen, benachteiligt sind, da stromaufwärts immer benachbarte Lagerbereiche Pulks abschicken. Daraus ergibt sich die Problematik, dass große Pulks geringere Chancen haben, in einen Förderkreis eingeschleust zu

werden. Das kann große Durchsatzverluste nach sich ziehen, weil kleinere Lücken nicht nutzbar sind.

Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 9 aufgegriffen. Obwohl die Verzögerung nur 15 s betragen und damit die Rezirkulationsrate um 14 % sinkt, steigt die Betriebszeit des Systems um 11 %. Eine gleichmäßige Entsorgung der Lagerbereiche kann zwar so sichergestellt werden, dies geht aber auf Kosten der Betriebsdauer.

4 Ergebnis und Ausblick

Durch die Nutzung der Simulationstechnik bei der Gestaltung von Transport- und Sortiersystemen, die mit Pulks arbeiten, können erhebliche Rationalisierungspotenziale identifiziert werden. Variable Pulklängen stellen ein besonderes Problem dar, weil sie Materialflusskomponenten unterschiedlich lange belegen und somit erhebliche Behinderungen für weitere Pulks darstellen können. Diese Auswirkungen zu quantifizieren, gelingt mit Hilfe von Simulationsmodellen. Auf dieser Basis können Faustformeln entwickelt werden, die bei der Auslegung von Systemkomponenten helfen, Überdimensionierungen zu vermeiden. Des Weiteren können diese Erkenntnisse in Leitstände und Entscheidungsunterstützungssysteme einfließen und operative Planungen unterstützen.

Große Pulks führen zu erheblichen Durchsatzeinbußen, da sie häufiger auf Puffer an ihren Ausschleuspunkten treffen, die schon belegt sind. In den hier durchgeführten Simulationsuntersuchungen ergab sich ein Richtwert von 1,5, der mit der maximalen Pufferlänge multipliziert werden muss, als Kenngröße zur Auslegung von Puffern.

Die zeitlich verzögerten Starts nachfolgender Pulks in den einzelnen Lagerbereichen führt insgesamt zu höheren Betriebskosten, das Vermeiden möglicher Rezirkulationen lohnt sich offensichtlich nur dann, wenn weitere Materialflussströme behindert werden.

Es besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf zur Ermittlung geeigneter Steuerstrategien von Pulksystemen. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass nur durch die Synchronisation der Materialflüsse, Effizienzgewinne zu erzielen sind.

Literatur

- Clausen U.; Diekmann D.; Baudach J.; Pöting M: Mathematische Optimierung und Simulation von Paketsortieranlagen – Bessere Lösungen durch Kopplung der beiden komplementären Methoden. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in Production and Logistics 2015. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2015, S.279-288.
- Fritz M.; Wolfschluckner A.; Jodin D.: Simulation von Paketen im Pulk. Logistics Journal (2013) (urn:nbn:de:0009-14-38137).
- Irrgang R.: Zuverlässigkeit als oberste Priorität. Hebezeuge Fördermittel 48 (2008) 7-8, S.472-475.
- Lux D.: Verfahren zum Sortieren von Einzelstücken und Sortieranlage. Europäisches Patent EP 0 723 483 B1 1994, S. 1-21.
- Roos R.; Söllner E.; Braun G.: Materialflussplanung eines Versandzentrums, in Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. In: Biethahn J.; Hummeltenberg

- W.; Schmidt B.; Stähly P.; Witte T. (Hrsg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Heidelberg: Physica 1999, S. 198-218.
- Turek K.; Marquart H.-G.: Beitrag zur Dimensionierung von automatischen Sortiersystemen (Sorter). Logistics Journal (2007). Nicht referierte Veröffentlichungen – ISSN 1860-5923, DOI 10.2195/LJ_Not_Ref_Turek_072007, S. 1-4.
- VDI 3619: Sortier- und Verteilsysteme für Stückgut. Berlin: Beuth 2017.
- Wilson D.; Laney R.: The Use of Simulation for Clothing Manufacturing Executives; a Case Study. MODSIM: International Congress on Modelling 2003. https://www.mssanz.org.au/MODSIM03/Volume_04/C06/14_Wilson.pdf.
Letzter Zugriff am 20.3.2017.

Developing a Motion Study Simulation Object Toolkit

Entwicklung eines Simulationstoolkits für Bewegungsanalysen

Norbert Szántó, Gergő Monek, János Jósvai, Széchenyi István University, Győr
(Hungary), szanto@sze.hu, monek.gergo@sze.hu, josvai@sze.hu

Abstract: The goal of developing a simulation object set that supports the slowly executed movement methods is to facilitate a quicker, more flexible application in the perspective of the movement analysis and the process simulation. To achieve this purpose, the slowly executed movement methods need to be implemented into a simulation environment, such as an independent subassembly. The scientific background of the movement analysis and the requirements of the developed object, furthermore the development steps, the functionality and usefulness of the object set are introduced in the article.

1 Introduction

The continuous improvement of production efficiency requires development of both the participating workers, equipment and the working environment. This is especially relevant in the stage of planning the production volume and methods when creating new factories. The motion study and the work-requirement measurements are important elements of the efficient and ergonomic working process design phase.

The application of the motion study systems require high professional skills, a lot of practice, and experience; however this is a slow process. This analysis is an analytical manner, which can be paper-based or electronic as well. The results can be used in the later stages of planning but the process must be restarted if there are any small changes. For industrial applications a frequent tendency is to measure standard time by stopwatch or by analysing videos, and that is why the definition of the time base of non-existent posts is very difficult and complicated.

Today's production planning processes take place in the digital environment. Expected future behaviour analysis and various operating conditions can be evaluated using process simulation software. Furthermore, it is possible to enter a time constant or a stochastic function for the modelled jobs in the process simulation software. Both originate from some kind of historical data. A detailed application of any movement analysis is not manageable, as the measurement results and obtained sub-activities

during the work would break the workflow into small and distinct units, which results in an unnecessarily overcomplicated model.

These factors affected the development of a motion analysis simulation toolkit. The development took place at the Department of Vehicle Manufacturing at Széchenyi István University using the Tecnomatix Plant Simulation in which the authors have significant resource and development experience.

2 Motion Study

The first widely used work measurement method was the Methods-Time Measurement also known as MTM, developed in 1948 by Maynard, Schwab, and Stegemerten. The MTM system has a detailed data card of basic motions, each associated with particular variables. The initial MTM system is known as MTM-1. Subsequent modifications were later developed to provide an easier and quicker system by condensing and reducing the number of motion options and time values. In addition, the MTM systems include MTM-V, MTM-C, MTM-M, MTM-TE, MTM-MEK, and MTM-UAS. The advantages of the predetermined motion time systems compared to traditional work measurements are that they are of greater consistency, internationally applicable, and provide a reproducible experimental description (Maynard et al. 1948; Salvendy 2001).

2.1 MOST Analysis

The development of the Maynard Operational Sequence Technique (MOST) is a significant achievement in the area of work measurement. MOST has all the advantages of MTM but provides a much quicker and easier application. The simple and universal structure also makes it efficient. The system uses sequence models moreover the main work units are no longer basic motions. Activities are described in terms of sub-activities fixed in a sequence. MOST concentrates on the movement of objects (Zandin 2003).



Figure 1: Connection between industrial work-measurement techniques and the simulation (Zandin 2003)

The goal when developing MOST was to compare its accuracy with the MTM-1 method. Another basic requirement for measuring the accuracy of a working measurement system is that the resolution of operations to base moves will help reduce user errors in the system. The most accurate systems, which breakdown activities to base moves (e.g. MTM-1), are the most vulnerable to user mistakes. When

utilizing MOST users get very similar results after the analysis because of the few index and parameter intervals. The times or index values for the motions are immediately available to the analyst from data cards or, after experience, from memory or, even better, in a computer's memory (Zandin 2003).

The simple structure of MOST also makes it quicker to apply other predetermined motion time systems. The difference between MOST and other measurement methods is a consequence of the fact that MOST can perform the analysis in less time than the other methods, which use predetermined times (Zandin 2003).

WORK MEASUREMENT TECHNIQUE	TOTAL TMU PRODUCED PER ANALYST HOUR
MTM-1	300
MTM-2	1000
MTM-3	3000
MOST	12000

Figure 2: Comparison of application speeds (Zandin 2003)

So using MOST can measure 10 to 40 times faster than MTM-1. Generally one hour of work can be measured using MOST with an average 5 to 10 hours of analyst time, depending on the complexity of the work (Zandin 2003).

2.2 BasicMOST Analysis

Systems of the MOST family include three main sub-systems: Basic-, Mini-, and Maxi-MOST. The basis of the simulation toolkit is the BasicMOST. It is the most commonly used version of MOST. At the intermediate level, activities that are likely to be performed more than 150 but less than 1500 times per week should be analysed with it. An operation in this category may range from a few seconds to 10 minutes. The operations length in this category may range between 7 to 70 seconds (200 to 2000 TMU (Time Measurement Units)). Distances in BasicMOST are typically analysed within reach and up to 10 steps. The majority of operations in most industries fall into this category (Zandin 2003).

The system uses sequence models; moreover the main work units are no longer basic motions. Activities are described in terms of sub-activities fixed in a sequence. MOST concentrates on the movement of objects. Users need three activity sequences in BasicMOST to describe manual work (Zandin 2003):

- General Move
- Controlled Move
- Tool Use

These activity sequences build on parameters based on the computerized analysis of tens of thousands of MTM studies (Zandin 2003).

2.2.1 General Move

The General Move deals with the spatial displacement of one or more objects. Under manual control, the object follows an unrestricted path through the air. The sequence model takes the form of fixed of parameters (letters) representing each of the various sub-activities of the General Move. The displacement of an object occurs in three distinct phases, as shown by following the General Move Sequence Model breakdown (Zandin 2003).



Figure 3: General Move sequence model (Zandin 2003)

Where:

A = Action Distance

B = Body Motion

G = Gain Control

P = Placement

BASIC MOST	GENERAL MOVE			ABGABPA
INDEX x10	A ACTION DISTANCE	B BODY MOTION	G GAIN CONTROL	P PLACEMENT
0	≤ 5 CM			PICKUP TOSS
1	WITHIN REACH		LIGHT OBJECT LIGHT OBJECTS SIMO	LAY ASIDE LOOSE FIT
3	1-2 STEPS	SIT OR STAND BEND AND ARISE 50% OCC.	LIGHT OBJECTS NON-SIMO HEAVY OR BULKY BLIND OR OBSTRUCTED DISENGAGE INTERLOCKED COLLECT	LOOSE FIT BLIND OR OBSTRUCTED ADJUSTMENTS LIGHT PRESSURE DOUBLE PLACEMENT
6	3-4 STEPS	BEND AND ARISE		CARE OR PRECISION HEAVY PRESSURE BLIND OR OBSTRUCTURED INTERMEDIATE MOVES
10	5-7 STEPS	SIT OR STAND WITH ADJUSTMENTS		
16	8-10 STEPS	STAND AND BEND BEND AND SIT CLIMB ON OR OFF THROUGH DOOR		

Figure 4: General Move data card (Zandin 2003)

The index value of parameters depending on the type of activity can be selected from the data card (Fig. 4). The time to perform activities is computed by adding all index values in the sequence model and multiplying it by 10 to convert to TMU (Time Measurement Units, 1 TMU = 0,036 second).

2.2.2 Controlled Move

The Controlled Move describes the manual displacement of an object over a controlled path. That is, movement of the object is restricted in at least one direction by contact with or attachment to another object, or the nature of the work demands that the object be deliberately moved along a specific or controlled path (Zandin 2003).

GET			MOVE OR ACTUATE			RETURN
A	B	G	M	X	I	A

Figure 5: *Controlled Move sequence model (Zandin 2003)*

Where:

A = Action Distance

B = Body Motion

G = Gain Control

M = Move Controlled

X = Process Time

I = Alignment

The index values of the Controlled Move can also be determined from a data card.

2.2.3 Tool Use

The Tool Use Sequence Model is comprised of phases and sub-activities from the General Move Sequence Model along with specially designed parameters describing the actions performed with hand tools or, in some case, mental processes that are required when using a sense as a tool (Zandin 2003).

GET TOOL OR OBJECT			PUT TOOL OR OBJECT IN PLACE			TOOL ACTION	PUT TOOL OR OBJECT ASIDE			RETURN OPERATOR
A	B	G	A	B	P	*	A	B	P	A

Figure 6: *Tool Use sequence model (Zandin 2003)*

Where *:

F = Fasten

L = Loosen

C = Cut

S = Surface Treat

M = Measure

R = Record

T = Think

The index values of Tool Use can also be determined from a data card. The Tool Use Sequence Model can be used to determine the time needs for work with the following tools (Zandin 2003):

- Wrenches (T-wrench, Hexagon, etc.)
- Other Tools (Screwdriver, Hammer, etc.)
- Measuring Tools (Fixed scale, Micrometer, etc.)
- Cutting Tools (Scissor, Knife)
- Cleaning Tools (Brush, Wiping cloth, etc.)
- Writing Tools (Pen, Marker, etc.)

3 Development Steps

The platform of the developed object is an object-oriented discrete-event simulation software, called Tecnomatix Plant Simulation. Object-oriented environment is a programming paradigm based on the concept of communication between objects. The objects store data and perform operations upon request. The developed tool is an object in the given simulation environment (Bangsow 2015).

The object toolkit of MOST needs to be defined before specifying the development requirements. The appropriate tool can be created if the following objectives are met:

- provide an opportunity to analyse a wide range of operations,
- assist the work of the user with predefined sequence models and analysis decision questions,
- quick and easy application,
- possibility to edit and delete individual activities,
- the objects contain a summary overview of the used sequence analysis models and their parameters,
- the object should be imported into the software's toolbar,
- time value, which is obtained from the analysis, should be the object processing time and the material flow should be seen in the simulation run,
- possibility to use the main simulation options (entrance-, exit controls; shift calendar; failures; importer; statistics; etc.).

After defining the requirements, the main steps of the development are listed below. During the development, each task was elaborated in detail, taking into account the theoretical step of the motion analysis and the condition system of the simulation environment as well as user-friendly applicability.

1. Schematic representation of the MOST analysis algorithm, elaboration of the operating logic of the object.

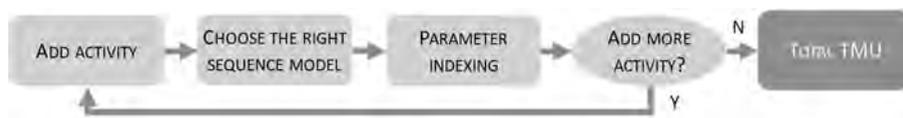


Figure 7: Functional logic

2. Create a graphical and functional sketch of the user interface; define the required dialog items (button, drop-down list, checkbox, etc.).
3. Create the data tables required for the MOST analysis in the simulation software. The developed object stores the index values for the specified parameters from the data tables.
4. Write the methods required for the operation of the user interface elements; these methods are the elements in the dialog or changes in its elements.
5. Implementing the functional attributes of a general material flow object into the developed object.
6. Adding help dialogs and descriptions to the object.

4 MOST Object Toolkit

The user interface of the object looks like the well-known structure of Plant Simulation. A new activity can be added on the basic label of the start screen.

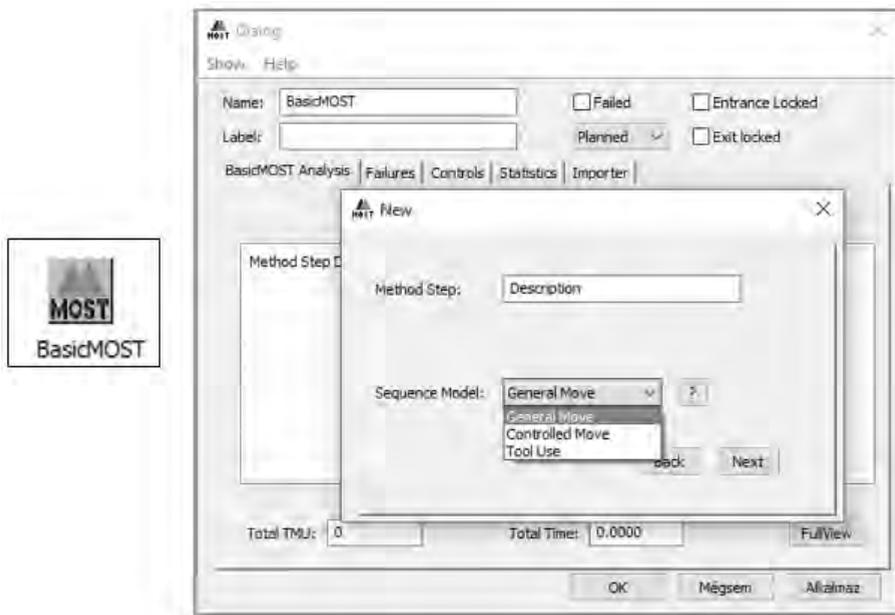


Figure 8: Dialog window, add activity

We can choose from three predefined sequence models (Fig. 8) when adding a new activity. Inexperienced users in movement analysis have the opportunity to click on the question mark symbol (?) where they can get information about the features of each of the sequence models in a pop up window. A dialogue window shows up after selecting the appropriate model (Fig. 9). The suitable parameters should be selected from the drop-down menu. If their frequency is partial, the checkbox next to the drop-down menu needs to be selected. Partial frequency means that there is a repetition of the partial activities (for example installing six screws) and the number of times it is

repeated can be determined in the textbox called *Partial FR*. The reps of the complete operation can be configured in the textbox *Frequency*.

The screenshot shows a dialog box titled "General_Move" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into three sections, each with a question and several options:

- How does operator 'get' object (ABG) ?**
 - Action Distance: < 50 mm (dropdown) with a checkbox labeled "PF" to its right.
 - Body Motion: No motion (dropdown) with a checkbox to its right.
 - Gain Control: Collect (dropdown) with a checkbox to its right.
- How does operator 'put' object (ABP) ?**
 - Action Distance: Within Reach (dropdown) with a checked checkbox to its right.
 - Body Motion: No motion (dropdown) with a checked checkbox to its right.
 - Placement: Loose Fit (dropdown) with a checked checkbox to its right.
- Does operator 'return', 'clear hands' (A) ?**
 - Action Distance: No Return (dropdown)

At the bottom of the dialog, there are two text input fields: "Partial FR:" containing the number "6" and "Frequency:" containing the number "3". Below these fields are two buttons: "Back" and "Next".

Figure 9: General move parameters window

After setting up the required parameters we can go back to the main window. The already taken up operations can be seen with their main parameters in a table (Fig. 10). Every operation can be edited separately; they can also be deleted if necessary, so we are able to refresh our simulation model easily according to the changes in our physical system.

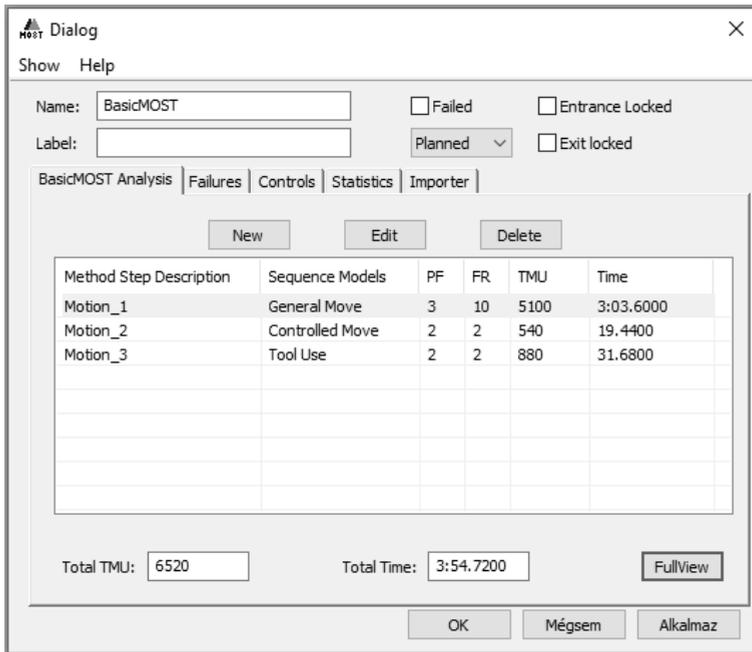


Figure 10: BasicMOST main dialog window

Time units belong to each activity in two different formats: TMU and *mm:ss*. The total time of the complete operation can be seen at the bottom of the interface. These time units are used by the simulation object as a “ProcTime” datatype, which means that this mobile units are spent on the operation of the object. The object gives the opportunity for the user to summarize the activities for the given workplace in one object or to detail the activities separately in the simulation model.

5 Conclusion

The MOST system can be applied directly in simulation software so it is possible to use one of the main advantages of the analysis, which is the increased application speed. In addition it is also integrally usable in manufacturing simulation or in newly planted and existing system analyses as well.

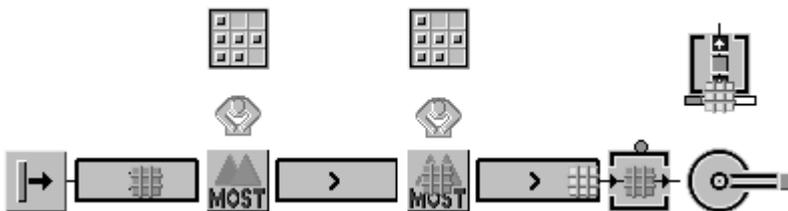


Figure 11: Demo model

The finished object allows the users to analyse from simple operations and activities to more complicated and complex operations. It provides transparent, simple editing for the implementation of the improvement measures. All calculations of the simulation software can be stored, eliminating the need for other additional documentation. After completing the analysis of the workstation the time value is immediately received and during the simulation this calculated value will be applied to the operation. It sets the standard time, which is required in order to perform the operation. It is also suitable to examine the working methods and associated job creation ideas concerning the establishment of an optimal workshop. The created object uses all the advantages of the method in the motion analysis so it is a widely usable tool for process simulation and optimization preparation.

The difficulties in the industrial applicability of measurement methods and the lack of usability in process simulation have together generated the need for development. The device takes advantage of the advanced simulation, which uses the benefits of work measurement methods and allows for the analysis of simple and complex activities. The set of objects includes further development potentials too. The next step is in the development of activities with a working distance measurement method. In doing so, instead of the standard values and data cards, the input values of the activities would come from material flow object-oriented simulation parameters.

Acknowledgement

The research was funded by FIEK (Győr, Hungary) Project “A Széchenyi István Egyetem egyedi innovációs támogatásáról szóló 1687/2015. (IX. 25.) Korm. határozat”.

References

- Bangsow, S.: Tecnomatix Plant Simulation. Berlin, Heidelberg: Springer 2015.
- Maynard, H.B.; Harold, B.; Stegemerten, G.J.; Schwab, J.L.: Methods-time measurement. New York: McGraw-Hill 1948.
- Salvendy, G. (Ed.): Handbook of industrial engineering Vol. 2. Hoboken: Wiley 2001.
- Zandin, K.B.: MOST work measurement systems. Basel: Marcel Dekker 2003.

Einfluss von Mitarbeiterqualifikationszeiten im Rahmen nachhaltiger Produktionsplanung

Influence of Employee Qualification Times in the Context of Sustainable Production Planning

Thorsten Vitzthum, Thorsten Claus, TU Dresden – IHI Zittau, Lehrstuhl für
Produktionswirtschaft und Informationstechnik, Dresden (Germany),
thorsten.vitzthum@tu-dresden.de, thorsten.claus@tu-dresden.de

Frank Herrmann, OTH Regensburg, Innovationszentrum für Produktionslogistik und
Fabrikplanung (IPF), Regensburg (Germany), frank.herrmann@oth-regensburg.de

Abstract: This research paper evaluates the potential of reducing shortages and costs that are created by training measures as an example for measurement of extended qualification of key employees in sustainable production planning. Capacity planning with standard methods in Enterprise Resource Planning Systems, namely priority rules, are used. Almost always, the optimal solution is not found, although there is one. In addition, unnecessarily high stocks are built up. In real business situations, this causes lost profits.

1 Einführung und Literaturrecherche

Das Thema Nachhaltigkeit ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Eine allgemeingültige Definition für den Begriff Nachhaltigkeit existiert nicht. Für diesen Beitrag wird folgende Definition verwendet: Nachhaltiges Handeln beschäftigt sich mit der Frage, wie die Bedürfnisse des Einzelnen und der Gesellschaft unter Berücksichtigung ökonomischer, sozialer und ökologischer Aspekte erfüllt werden können, ohne dabei die Bedürfnisse zukünftiger Generationen zu gefährden. In Carnau (2011, S. 14) wird zum Thema Nachhaltigkeit angemerkt: „Beim Konzept Nachhaltigkeit geht es weniger um eine exakte Definition von Nachhaltigkeit, sondern um die Bestimmung dessen, was Bestand haben soll und um die Verknüpfung der zeitlichen und räumlichen Ebene, die eine Nachhaltigkeitspolitik einzubeziehen hat. Die Grundidee basiert also auf der einfachen Einsicht, dass ein System dann nachhaltig ist, wenn es selber überlebt und langfristig Bestand hat. Wie es konkret auszusehen hat, muss im Einzelfall geklärt werden“.

Im Zuge des Brundtland-Berichts wird ein gängiges Nachhaltigkeitsmodell aufgestellt, das auf den drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziologie, die als Säulen bezeichnet werden, beruht (Brundtland 1987).

Produktionsprogramme beeinflussen alle drei Säulen des Nachhaltigkeitsmodells. Üblicherweise stehen hierbei die ökonomischen Aspekte wie Reduzierung der Lagerkosten und Kosten für Zusatzkapazität (Günther und Tempelmeier 2014) im Vordergrund. Doch zunehmend gewinnen die ökologischen Aspekte wie Emissionsreduzierung oder Minimierung des Energieverbrauchs (Absi et al. 2013; Battini et al. 2014) und soziologischen Aspekte wie Belastung oder Qualifikation von Mitarbeitern (Boysen und Fliedner 2011; Jaber und Bonney 2007) an Bedeutung.

Der Mitarbeiter gewinnt durch die zunehmende Spezialisierung und Qualifizierung, im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und der damit verbundenen Hochautomatisierung, an Bedeutung (Spath 2014). Begründet wird dies durch den zunehmenden Einfluss von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), verbunden mit Echtzeitinformationen. Eine Umfrage von Spath (2014) ergab, dass „[...] zwei Drittel der Unternehmen ihren Aufwand zur Steuerung der Personalkapazität als zu hoch oder zumindest als zeitweise zu hoch [...]“ empfanden. Weiter wird erwartet, dass sich die Produktion zukünftig häufiger an neue Produkte und Prozesse anpassen muss, wodurch zusätzlicher Bedarf an Mitarbeiterqualifikation entsteht (Spath 2014).

Dombrowski et al. (2014) sehen die Zukunft der Fertigung in einem Werkzeugszenario, in dem der weiterhin dominante Facharbeiter durch cyberphysische Systeme als eine Art Werkzeug unterstützt wird. Dombrowski et al. (2014, S. 138) verweist in diesem Zusammenhang auf Schlund und Gerlach (2013) und merken dazu an, „auch wenn menschliche Arbeitskräfte in Zukunft weniger relevant für eine physische Ausführung der Arbeitsaufgaben sein werden, ist ihre Funktion als intelligenter Entscheider in ungeplanten und nicht vorhersagbaren Situationen weiterhin von großer Bedeutung. Darüber hinaus kann der Mensch als eine Art Problemlöser eingesetzt werden und somit ein System intelligenter, technischer Objekte als elementaren Baustein vervollständigen.“

Die Hochautomatisierung macht es erforderlich, für gewisse Maschinen speziell qualifizierte Mitarbeiter zu haben. Die Mitarbeiter lassen sich in unterschiedliche Personaltypen einteilen. Durch einen Personaltyp werden Mitarbeiter gleicher Qualifikation zusammengefasst (VDI 3633 Blatt 6 2001). Die Art der Qualifikation bestimmt, welche Maschinen der Personaltyp bedienen kann. Nicht jeder Mitarbeiter muss eine spezielle Qualifikation aufweisen. Allerdings besteht eine Abhängigkeit von diesen hochqualifizierten Mitarbeitern, da diese aufgrund ihrer Erfahrung und Qualifikation nicht ohne Weiteres ersetzt werden können. Stellvertretend für die soziologische Säule der Nachhaltigkeit wird in dieser Arbeit die Mitarbeiterqualifikation betrachtet.

In klassischen kommerziell verfügbaren Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS-Systemen) erfolgt eine Zerlegung des Gesamtplanungsproblems in mehrere sukzessive abzuarbeitende Teilplanungsprobleme. Dieses Model geht auf Drexl et al. (1994) zurück. Es besteht aus den Stufen der aggregierten Gesamtplanung (AGGRPLAN), der Hauptproduktionsprogrammplanung (HPPLAN), der Materialbedarfsplanung (MRP), bestehend aus der Nettobedarfsrechnung, der Losgrößenbildung, der Durchlaufterminierung und der Kapazitätsplanung, sowie der Fertigungssteuerung (Herrmann 2011; Kurbel 2011).

Bislang wurde in den meisten Fällen der Termin der Schulung, unabhängig von der Auftragssituation des Unternehmens, festgesetzt. Das Vorgehen wurde von Rottinger (2005) im Kapitel „Festlegung der Zeitfenster für Personalentwicklungsmaß-

nahmen im Technologiekalender“ beschrieben. Auswirkungen auf die Ressourcenbelegung und auf das Produktionsprogramm wurden nicht quantifiziert.

In diesem Beitrag werden gängige Einplanungsvarianten einer Schulung im Rahmen kommerziell verfügbarer PPS-Systeme untersucht. Üblicherweise erfolgt die Planung durch Prioritätsregeln. Um eine von solchen Prioritätsregeln unabhängiges Ergebnis zu bekommen, erfolgt eine simulationsgestützte Planung (Abschnitt 2). Die Untersuchung erfolgt für eine realistische Fallstudie, die in Abschnitt 3 beschrieben ist. Die Simulationsexperimente und die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 4 dargestellt. Mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick (Abschnitt 5) wird der Artikel beendet.

2 Simulationsgestützte Planung

Grundlage ist der in kommerziell verfügbaren PPS-Systemen realisierte Planungsprozess aus Materialbedarfsplanung (MRP) - die Produktionsaufträge liefert -, ihre nachfolgende Durchlaufterminierung und der Fertigungssteuerung. Die Mengenplanung bei der Materialbedarfsplanung erfolgt dabei iterativ für jedes Erzeugnis entlang von Dispositionsstufen. Dabei besteht jeder Schritt aus der Sekundärbedarfsauflösung gefolgt von der Losgrößenberechnung. Die so entstandenen Produktionsaufträge werden anschließend terminiert. Durch die Durchlaufterminierung und die Kapazitätsplanung wird die beschränkte Kapazität auf Produktionssystemebene berücksichtigt. Die nachgelagerte Fertigungssteuerung plant die einzelnen Arbeitsschritte auf den einzelnen Stationen (Claus et al. 2015; Herrmann 2011; Kurbel 2011; Vollmann et al. 2011). Da die Schulungen sehr lange dauern, wird in dieser Untersuchung auf die Fertigungssteuerung verzichtet. Die Durchlaufterminierung erfolgt in der simulationsgestützten Planung mit Hilfe von Prioritätsregeln. Es werden die Prioritätsregeln kürzeste Operationszeit (KOZ), kürzeste Pufferzeit (KPZ), frühester Endzeitpunkt (FEZ) und Critical Ratio + Shortest Processing Time (CR+SPT) exemplarisch verwendet. Bei der KOZ-Regel wird der Auftrag mit der kleinsten Bearbeitungszeit, die sich aus seiner Stückbearbeitungszeit multipliziert mit der Produktionsmenge berechnet, bevorzugt. Die Materialbedarfsplanung bestimmt Endtermine. Die FEZ-Regel bevorzugt den Auftrag mit dem kleinsten Endtermin. Die KPZ-Regel bevorzugt den Auftrag mit der geringsten Differenz zwischen Endtermin und frühesten möglichen Fertigstellungstermin (aktueller Zeitpunkt plus Bearbeitungszeit), diese Differenz wird als Puffer bezeichnet. Für bereits verspätete Aufträge plant die CR/SPT nach der KOZ-Regel ein und für die anderen Aufträge nach dem Quotienten aus der Zeit bis zum Endtermin (des Auftrags) und seiner Bearbeitungszeit, wobei der kleinste Wert bevorzugt wird (Herrmann 2011; Fandel 2009). Aufgrund der Überlegungen in Herrmann (2011) liefern die Regeln CR+SPT, KPZ und FEZ pareto-optimale Ergebnisse für die mittlere Verspätung und die Streuung der Verspätung. Die simulationsgestützte Planung durchsucht den durch diese Prioritätsregeln aufgespannten Baum an möglichen Plänen nach dem Verzweige- und Begrenze-Prinzip. Im Verzweige-Schritt werden von den zu einem Planungszeitpunkt vorliegenden Produktionsaufträgen (PA1) ein oder mehrere nach einer Prioritätsregel wie KOZ eingeplant, wodurch eine resultierende Auftragsmenge (PA2) entsteht. Dies ist in der Abbildung 1 dargestellt. Dadurch entstehen vier Teilpläne nach diesen Prioritätsregeln mit einer Länge von m zugeteilten Produktionsaufträgen.

Dieser Verzweige-Schritt wird n mal iteriert. In einem anschließenden Begrenze-schritt werden p Teilpläne ausgewählt. Typische Kriterien sind die mittlere Verspätung und die Streuung der Verspätung. Diese Verzweige- und Begrenzeschritte werden solange wiederholt, bis alle Produktionsaufträge aus PA1 eingeplant sind.

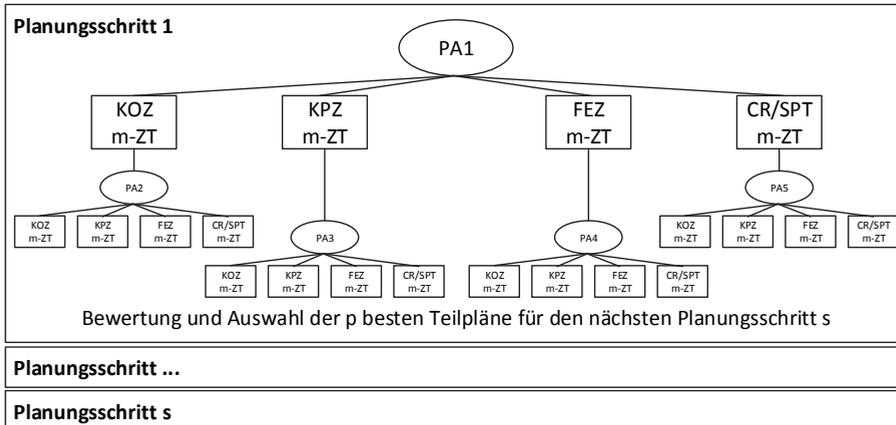


Abbildung 1: Simulation gestützte Planung – Verzweige- und Begrenze-Prinzip

Ein Parameter von $m = 1$ und ein maximales n bewirken eine vollständige Enumeration aller durch die vier Prioritätsregeln (r) möglichen Pläne. Bei einem Arbeitsvorrat von zehn Produktionsaufträgen (x), $m = 1$ und maximalem n ergeben sich somit 262.144 Teilpläne. Die Anzahl der Teilpläne wächst exponentiell. Durch $m = 4$ reduziert sich die Anzahl der Teilpläne auf 65.536. In dem hier angewandten Verzweige- und Begrenze-Verfahren wird die Anzahl der Teilpläne nach einer vorher festgelegten Anzahl an Iterationen auf die p besten Lösungen reduziert. Wird unterstellt, dass alle zwei Iterationen die Teilpläne auf fünf reduzieren, verringert sich die Anzahl der insgesamt ermittelten Teilpläne auf 336. Um eine handhabbare Anzahl von Teilplänen zu erhalten, ist die Wahl kleiner Werte für n und p erforderlich und ggf. ein hoher Wert für m .

3 Fallstudie

Betrachtet wird in dieser Fallstudie ein Luftfahrtzulieferer der verschiedene Hitzeschilder für die Raumfahrtindustrie herstellt. Für die Herstellung werden hochwarmfeste Stähle benötigt, deren Umformung mit automatisierten und prozessgesteuerten Wärmebehandlungsanlagen erfolgt und die eine sehr hohe Reproduzierbarkeit haben müssen. Um überhaupt als Zulieferer im Bereich der Luft- und Raumfahrt tätig werden zu können, bedarf es eines hohen Qualitätsstandards. Die Leistungsfähigkeit ist gegenüber dem Auftraggeber in Form von Zertifikaten (DIN EN 9100:2017-02) zu erbringen. Betrachtet wird dabei ein Produktionssystem, in dem in einem einstufigen Produktionsprozess das Produkt Hitzeschild hergestellt wird. Es hat eine Stückbearbeitungszeit 3,33 Kapazitätseinheiten (KE)/Mengeneinheit (ME) und verursacht Lagerkosten in Höhe von 20 Geldeinheiten (GE) je Woche und Mengeneinheit. Rüstzeiten und Rüstkosten werden

vernachlässigt. Das Produktionssystem hat eine Wochenkapazität von 40 KE. Es werden fünf Mitarbeiter eingesetzt. Der Planungszeitraum umfasst 15 Wochen. Ein Mitarbeiter soll in dem Betrachtungszeitraum eine Schulung erhalten. Die Schulung benötigt 40 KE, was wiederum der Kapazität einer Woche entspricht.

4 Simulationsergebnisse

Für die Untersuchung wird in Anlehnung an Rottinger (2005) davon ausgegangen, dass die Schulung als Personalmaßnahme festgelegt wird. Die Anforderungen der Produktion werden berücksichtigt, indem ein künstlicher Auftrag, im Folgenden als Schulungsauftrag bezeichnet, eingeplant wird. Für die Untersuchung erfolgt eine Langzeit-Simulation der (simulationsgestützten) Planung und der Umsetzung ihrer Planungsergebnisse durch eine Produktion. Dieser sogenannte PPS-Simulator ist in dem Simulationssoftwaresystem Plant Simulation 12 realisiert. Er besteht wie bei einem PPS-System aus der Nachbildung einer Produktion mit Maschinen, Werkstücken und Arbeitsplänen. Als Planungsalgorithmus wird die oben beschriebene simulationsgestützte Planung verwendet. Wie in der industriellen Praxis erfolgt eine rollende Planung. Es ist klar, dass Verspätungen bei einem stark ausgelasteten System auftreten. Um den Effekt der Einplanung einer Schulung zu beurteilen, werden solche Systeme betrachtet, bei denen die Einplanung der Produktionsaufträge aufgrund der Materialbedarfsplanung durch die First-In-First-Out-Regel (FIFO-Regel) nicht zu Verspätungen führt und noch genügend freie Kapazitäten für die Schulung bestehen. Eine Schulung fällt einmal pro Halbjahr an. Basierend auf freier Kapazität (κ) für Schulungen werden drei Szenarien untersucht. Beim Szenario 1 liegt κ zwischen dem einfachen und dem 1,5-fachen Kapazitätsbedarf für Schulungen, im Szenario 2 ist der Bereich das 1,5-fache bis zum 3-fachen und im Szenario 3 das 3-fache bis zum 5-fachen. Ausgewertet werden die mittlere Verspätung und die Streuung der Verspätung. Um statistisch signifikante Ergebnisse zu erhalten, wird die Simulation für einen sehr langen Zeitraum durchgeführt. 1.200 Wochen erweisen sich als ausreichend. Am wirkungsvollsten erweisen sich kleinere Werte für die simulationsgestützte Planung, konkret $m = 1/4$ des Arbeitsvorrates, $n = 2$ und $p = 4$. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse für unterschiedliche Kapazitätsbeanspruchungen: freie Kapazität (κ) für Schulungen und Kapazitätsbedarf (KB) für Schulungen

Szenario	1: $KB \leq \kappa \leq 1.5KB$	2: $1.5KB \leq \kappa \leq 3KB$	3: $3KB \leq \kappa \leq 5KB$
Mittlere Verspätung	7 Tage	3 Tage	0,7 Tage
Streuung (Verspätung)	3 Tage	1,27 Tage	0,14 Tage

Die Ergebnisse zeigen, dass es zum Teil zu deutlichen Verspätungen kommt. Zur Analyse der Ursachen wird das folgende, stark vereinfachte Teilproblem zugrunde gelegt und betrachtet. Die von der Materialbedarfsplanung erstellten Planaufträge für das Produkt Hitzeschild sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Planaufträge der Materialbedarfsplanung

Woche (t)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
Bedarf ($d_{A,t}$) [ME]	8	12	4	8	9	16	15	5	11	16	13	14	12	10	13	166
Planaufträge	8	12	4	8	9	16	15	5	11	16	13	14	12	10	13	166

Zur Analyse der einzelnen Effekte wird der Schulungsauftrag der Reihe nach zu jedem möglichen Wochenbeginn freigegeben und die Auftrageinplanung unter der Verwendung von einer der vier, in der simulationsgestützten Planung verwendeten Prioritätsregeln, durchgeführt. In Tabelle 3 ist das Gesamtergebnis angegeben. Eine Schulung gilt als durchführbar, wenn diese rechtzeitig innerhalb des Betrachtungszeitraums abgeschlossen wird. Der Tabelle kann entnommen werden, dass die Einplanung der Schulung immer zu Verspätungen führt. Je nach verwendeter Prioritätsregel und verwendetem Freigabetermin schwankt die Anzahl der verspäteten Aufträge zwischen eins und sieben. Die Anzahl der Gesamtverspätung bewegt sich dabei zwischen 27 ZE und 327 ZE.

Tabelle 3: Einplanung der Schulung durch Schulungsauftrag (S)

Freigabetermin des Schulungsauftrages (S)	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10
Prioritätsregel KOZ										
Anzahl der Verspätungen	1	7	7	7	7	7	4	4	4	6
Gesamtverspätung [ZE]	27	50	50	327	327	287	217	217	217	193
Schulung durchführbar	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Prioritätsregel KPZ										
Anzahl der Verspätungen	1	7	7	6	6	6	6	6	6	6
Gesamtverspätung [ZE]	27	50	50	193	193	193	193	193	193	193
Schulung durchführbar	Ja	Ja	Ja	Nein						
Prioritätsregel FEZ										
Anzahl der Verspätungen	1	7	7	7	7	7	4	4	4	6
Gesamtverspätung [ZE]	27	50	50	327	327	287	217	217	217	193
Schulung durchführbar	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Prioritätsregel CR/SPT										
Anzahl der Verspätungen	1	7	7	6	6	6	6	6	6	6
Gesamtverspätung [ZE]	27	50	50	193	193	193	193	193	193	193
Schulung durchführbar	Ja	Ja	Ja	Nein						

Wie aus der Literatur bekannt (Tempelmeier 2008; Herrmann 2011) vermeidet eine frühere Freigabe Verspätungen. Dies setzt den Kreislauf (Wiendahl 2014; Günther und Tempelmeier 2014; Herrmann 2011) aus längeren Wartezeiten an den Stationen

und damit höheren Lagerbeständen, längeren Durchlaufzeiten und damit noch früherer Auftragsfreigabe in Gang. Eine frühere Auftragsfreigabe ist somit in der Regel nicht als alleinige Lösung geeignet. Die negativen Auswirkungen werden im Rahmen dieser Fallstudie vernachlässigt. Es soll gezeigt werden, dass selbst beim Vernachlässigen dieser Auswirkungen das Simulationssystem nicht in der Lage ist, die optimale Lösung zu finden. Eine weitere extreme Variante besteht darin, alle Planaufträge eines Planungshorizonts zum Beginn des Planungslaufs freizugeben. Das resultierende Ergebnis ist in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Einplanung der Schulung durch Schulungsauftrages (S) Planung bei früherer Auftragsfreigabe

Freigabetermin des Schulungsauftrages (S)	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10
Prioritätsregel KOZ										
Anzahl der Verspätungen	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6
Gesamtverspätung [ZE]	297	297	297	297	297	327	327	327	287	360
Schulung durchführbar	Ja	Nein								
Prioritätsregel KPZ										
Anzahl der Verspätungen	0	0	0	0	0	3	3	3	3	4
Gesamtverspätung [ZE]	0	0	0	0	0	17	17	17	17	57
Schulung durchführbar	Ja	Nein								
Prioritätsregel FEZ										
Anzahl der Verspätungen	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Gesamtverspätung [ZE]	297	297	297	297	297	327	327	327	287	360
Schulung durchführbar	Ja	Nein								
Prioritätsregel CR/SPT										
Anzahl der Verspätungen	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4
Gesamtverspätung [ZE]	0	0	0	0	0	57	57	575	57	57
Schulung durchführbar	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	Nein

Durch die Verwendung der früheren Freigabetermine können die Aufträge flexibler eingeplant werden. Dadurch können von der Auftragsfreigabe bei der Verwendung der beiden Prioritätsregeln KPZ und CR+SPT Lösungen ohne Fehlmengen ermittelt werden. Allerdings werden dabei Lagerbestände aufgebaut. Die Anwendung von diesem Vorgehen bei der obigen Langzeitsimulation reduziert die Verspätungen nahezu vollständig.

Zur Nutzung der Idee einer früheren Auftragsfreigabe wird folgender Algorithmus realisiert. Zunächst wird der maximale Puffer ermittelt, in dem eine Rückwärts- und eine Vorwärtsterminierung durchgeführt wird (Herrmann 2011). Ist dieser Puffer für die Schulung groß genug, so ist diese ohne Auftreten von Verspätungen durchführbar. Anderenfalls wird die Auftragsfreigabe erhöht. Realisiert wird ein Verfahren, bei dem die Aufträge in der zweiten Periode eine frühere Freigabe von

einer Periode erhalten, dann die der dritten Periode usw. Reicht dies nicht, bekommen die der dann zweiten Periode eine um eine Periode (zusätzlich) höhere Freigabe usw. Ist ein ausreichend hoher Puffer gewonnen worden, so werden Planaufträge so verschoben, dass ihre Lagerkosten abnehmen. Mit dem Planauftrag mit den höchsten Lagerkosten wird begonnen. Das Verfahren terminiert, wenn auf diese Weise keine Verringerung der Lagerkosten mehr möglich ist.

Die Anwendung dieses Verfahrens führt zu dem in Abbildung 2 angegebenen Ergebnis. Dieser ist zu entnehmen, dass alle Planaufträge rechtzeitig fertiggestellt werden können. Der Schulungsauftrag (S) kann zwischen Planauftrag zwei und Planauftrag drei eingeplant werden, ohne dass ein nachfolgender Planauftrag verspätet fertiggestellt wird und ohne dass ein Lagerbestand entsteht.

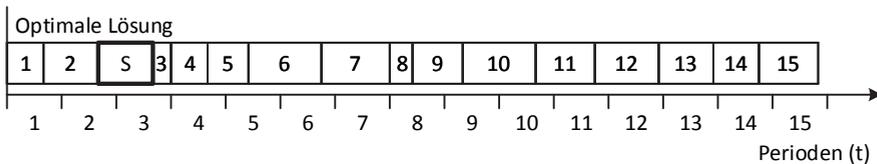


Abbildung 2: Optimale Lösung für die Einplanung der Schulung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in der industriellen Praxis vorherrschenden Enterprise Resource Planning Systeme unterstellen, dass Maßnahmen zur nachhaltigen Weiterentwicklung von Mitarbeitern, wie Schulungen, als externe (fixe) Parameter in die Planung eingehen. Anhand einer realistischen Fallstudie zeigt dieser Beitrag auf, dass dies nicht richtig ist, sofern eine solche Maßnahme einen signifikanten Zeitbedarf hat. Selbst bei einer hohen Flexibilität bei der Durchführung einer solchen Maßnahme werden durch die in der industriellen Praxis oftmals eingesetzten einfachen Verfahren zur Kapazitätsplanung, wie Prioritätsregeln, diese Maßnahmen zu spät eingeplant.

Die hier untersuchte simulative Durchführung mit pareto-optimalen Prioritätsregeln führt zu deutlich besseren Ergebnissen. Allerdings wird sehr häufig eine existierende Lösung ohne Verspätung nicht gefunden. Es sei betont, dass eine fixe Einplanung einer solchen Maßnahme deren zu späte Einplanung vermeidet, aber aufgrund der Existenz einer zulässigen Lösung den Unternehmensgewinn spürbar verringert. Das ganze Problem wird zusätzlich verschärft, wenn solche Maßnahmen für mehrere Mitarbeiter durchzuführen sind, die Maßnahmen nicht im gleichen Zeitraum erfolgen können und die Mitarbeiter für die Fertigung zusammen benötigt werden.

In der weiteren Forschung soll dieses resultierende Planungsproblem genauer charakterisiert werden. Für diese voraussichtlich neue Klasse an Planungsproblemen sollen effiziente und effektive Lösungsverfahren entwickelt werden. In der Regel sind die Kundenaufträge nicht so weit im Voraus bekannt, wie dies in dieser Fallstudie unterstellt worden ist. Aus diesem Grund und der in der Regel vorliegenden rollenden Planung erscheint eine Verwendung einer übergeordneten Planung erfolgversprechend zu sein.

Literatur

- Absi, N.; Dauzère-Pérès, S.; Kedad-Sidhoum, S.; Penz, B.; Rapine, C.: Lot sizing with carbon emission constraints. *European Journal of Operational Research* 227 (2013) 1, S. 55–61.
- Battini, D.; Persona, A.; Sgarbossa, F.: A sustainable EOQ model: Theoretical formulation and applications. *International Journal of Production Economics* 149 (2014), S. 145–153.
- Bouchery, Y.; Ghaffari, A.; Jemai, Z.; Dallery, Y.: Including sustainability criteria into inventory models. *European Journal of Operational Research* 222 (2012) 2, S. 229–240.
- Boysen, N.; Fliedner, M.: Scheduling aircraft landings to balance workload of ground staff. *Computers and Industrial Engineering* 60 (2011) 2, S. 206–217.
- Brundtland, G.; Hauff, V. (Hrsg.): *Unsere gemeinsame Zukunft: [d. Brundtland-Bericht]*. Grevén: Eggenkamp 1987.
- Carnau, P.: *Nachhaltigkeitsethik: Normativer Gestaltungsansatz für eine global zukunftsfähige Entwicklung in Theorie und Praxis*. Mering: Rainer Hampp Verlag 2011.
- Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2015.
- DIN 9700:2010-07: *Qualitätsmanagementsysteme – Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung*. Berlin: Beuth, 2010.
- Dombrowski, U.; Riechel, C.; Evers, M.: *Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution*. In: Kersten, W.; Koller, H.; Lödding, H. (Hrsg.): *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO-Verlag 2014, S. 129–153.
- Drexl, A.; Fleischmann, B.; Günther, H.-O.; Stadler, H.; Tempelmeier, H.: *Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme*. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 46 (1994), S. 1022–1045.
- Fandel, G.; Fistek, A.; Stütz, S.: *Produktionsmanagement*. Dordrecht [u.a.]: Springer 2009.
- Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik: Supply Chain und Operations Management*. Norderstedt: Books on Demand 2014.
- Haasis, H.-D.: *Produktions- und Logistikmanagement: Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen*. Wiesbaden: Gabler 2008.
- Herrmann, F.: *Logik der Produktionslogistik*. München: Oldenbourg 2009.
- Herrmann, F.: *Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung: Wirkung, Auswahl und Einstellhinweise von Verfahren und Parametern*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011.
- Jaber, M.Y.; Bonney, M.: Economic manufacture quantity (EMQ) model with lot-size dependent learning and forgetting rates. *International Journal of Production Economics* 108 (2007) 1-2, S. 359–367.
- Kurbel, K.: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie*. München: Oldenbourg 2011.
- Rottinger, S.: *Mehrphasige Personalentwicklungsplanung für Fertigungssysteme auf Basis des Technologiekalender-Konzeptes*. Karlsruhe: Univ.-Verl. 2005.

- Schlund, S.; Gerlach, S.: Der Mensch im industriellen Holozän. *Economic Engineering* (2013) 4, S. 22-26.
- Spath, D. (Hrsg.): *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0: [Studie]*. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2013.
- Tempelmeier, H.: *Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced-Planning-Systemen*. Berlin [u.a.]: Springer 2008.
- VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen*. Berlin: Beuth 2001.
- Vollmann, T.; Berry, W.; Whybark, D.; Jacobs, F. (Hrsg.): *Manufacturing planning and control for supply chain management*. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin 2011.
- Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser 2014.

Simulationsunterstützte Entwicklung von Methoden zur reaktiven Steuerung von Demontagelinien

Simulation-supported Development of Methods for the Reactive Control of Disassembly Lines

Jan Hrdina, Conti Temic microelectronic, Nürnberg (Germany),
jan.hrdina@continental-corporation.com

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

Abstract: Since many years, "sustainability" is playing an important role in Germany's economy and society. This involves the reprocessing of end-of-life products formerly declared as waste. However, in order to reuse components of them, disassembling is necessary. In contrast to assembly processes, the control of disassembly systems has some special features: for example, when disassembling an end-of-life product it is possible that components are not removable or even missing, so that stations and employees required for this purpose threaten to remain underutilised. Thus the problem of dynamic-reactive control arises, which results in a number of possibilities which extend far beyond the usual control measures in assembly systems. The paper describes a novel procedure for the control of disassembly lines designed to ensure their economic operation by adapting to the special requirements of disassembling and reacting dynamically to emerging problems. The effectiveness of the method is verified using a simulation example.

1 Anforderungen an einen wirtschaftlichen Demontagebetrieb

Demontagesysteme sind im Vergleich zur industriellen Teilefertigung und Montage meist durch eine geringe Wertschöpfung gekennzeichnet. Die bei der Demontage häufig vorherrschenden unwirtschaftlichen Abläufe verschärfen diese Situation zusätzlich. Außerdem ist die Demontage vielfach durch schlechte Arbeitsbedingungen (z. B. Lärm, Schmutz, muskuläre Belastung) geprägt. Daher gilt es zum einen, die Demontageskosten durch eine systematische Planung und Steuerung der Abläufe zu reduzieren. Zum anderen ist die Wirtschaftlichkeit der Demontage zu steigern, indem sie zunehmend einen industriellen Charakter erhält.

Automatisierung wird allenfalls in Kombination manueller Arbeitsvorgänge mit automatisierten Teilprozessen, also mit sog. hybriden Systemen bzw. flexibel automatisierten Systemen gesehen (Seliger et al. 2007, S. 290). Als Hemmnisse gelten dabei insbesondere die Heterogenität und Planungsunsicherheit des zu demontierenden Alterzeugnisspektrums sowie die nicht demontagegerechte Produktgestaltung (vgl. Bols 2002, S. 64 und S. 94). Insbesondere bei der Gewinnung von Sekundärerzeugnissen (z. B. von Ersatzteilen) ist eine automatisierte Demontage von Komponenten vielfach zu aufwendig.

2 Demontagespezifische Besonderheiten und deren Berücksichtigung in der vorliegenden Literatur

Neben der Planung eines geeigneten Demontagesystems (siehe z. B. Schwarz 2017) bietet deren Steuerung Möglichkeiten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Bestehende Steuerungsverfahren eignen sich jedoch dafür nur bedingt, da sie nicht hinreichend die spezifischen Eigenschaften der Demontage berücksichtigen. Insbesondere bei arbeitsteiligen Demontagesystemen wird das Steuerungsproblem durch die Vielfalt der Alterzeugnistypen und durch deren unterschiedliche Zustände erschwert (vgl. Kim et al. 2007, S. 198).

Während bei der Montage deterministische Bearbeitungszeiten vorliegen oder zumindest im Rahmen der Zeitwirtschaft angenommen werden, ist dieses Vorgehen für die Demontage in aller Regel nicht zielführend. Die Unsicherheit bezüglich des Zustandes der Alterzeugnisse bereitet erhebliche Probleme bei der Erstellung des Arbeitsplans, weil die Demontage im Gegensatz zur Montage in vielfacher Hinsicht mit Schwierigkeiten behaftet ist. So lässt sich z. B. der Abnutzungsgrad von Komponenten vor Beginn der Demontage nicht immer sicher beurteilen oder die Lösbarkeit von Verbindungen nicht garantieren. Da übliche Arbeitspläne jedoch einen strengen Determinismus zugrunde legen, eignen sich diese bestenfalls bedingt für die Demontage. Außerdem ist der Arbeitsablauf in der Montage im Grundsatz fest vorgegeben, da die auszuführenden Arbeitsvorgänge unveränderlich sind und für diese a priori eine Arbeitsmethode vorgegeben ist.

Bei der Demontage sind jedoch die auszuführenden Arbeitsvorgänge aufgrund der Unsicherheit bezüglich der Eigenschaften des zu demontierenden Alterzeugnisses nicht fest vorgegeben und daher auch nicht deterministisch (z. B. Grochowski und Tang 2009, S. 374). Die einzusetzenden Demontagemethoden müssen abhängig vom individuellen Zustand des Alterzeugnisses gewählt werden, aus denen sich dann ggf. die erforderlichen Bearbeitungszeiten ableiten lassen (Heinz et al. 2002; Zülch und Schwarz 2008, S. 328). Der Umfang der zu demontierenden Komponenten pro Alterzeugnis, d. h. die Demontagetiefe, ist außerdem nicht notwendigerweise vorgegeben, sondern muss abhängig vom Zustand des Alterzeugnisses jeweils neu bestimmt werden (vgl. Schiller 1998, S. 31). Damit ist logischerweise die Demontagetiefe auch nicht mit der Fertigungstiefe gleichzusetzen, da diese betriebsbezogen, nicht jedoch (alt-)erzeugnisbezogen ist.

Als Konsequenz erkannten bereits Geiger et al. (1996), dass die Demontage reaktiv gesteuert werden muss. Grund hierfür ist, dass die Gewinnung bestimmter Alterzeugniskomponenten vom Erfolg der Demontage ihrer Vorgängerkomponenten

abhängt und die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Demontage vom Zustand dieser Komponenten abhängt (vgl. ebd., S. 49).

Die in der Literatur vorgeschlagenen Steuerungskonzepte berücksichtigen demontagespezifische Schwierigkeiten jedoch nicht oder nur rudimentär (vgl. Hrdina 2014, S. 30ff.) – sofern solche überhaupt für arbeitsteilige Demontagesysteme unter Berücksichtigung eines Demontageauftragsprogramms bestehend aus verschiedenen Alterzeugnisvarianten existieren. Eine dynamische, reaktive Auftragssteuerung unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen erfolgt bei keinem der bisher vorgestellten Verfahren.

Um auf Störungen bzw. Demontageschwierigkeiten reagieren zu können, genügt es bei der Demontage nicht, diesen durch kurzfristige Änderungen der Auftragsreihenfolge mittels eines sog. Reschedulings oder Resequencings zu begegnen. Vielmehr muss das Demontagesteuerungsverfahren in der Lage sein, eine Rekonfiguration des bestehenden Flussprinzips im Sinne einer kurzfristigen reaktiven Ablaufplanung (z. B. eine Neuordnung einzelner Demontagevorgänge zu Demontagestationen) vorzunehmen. Außerdem muss das Verfahren eine Arbeitsverteilung in Verbindung mit einer adaptiv-dynamischen Arbeitsplanung durchführen (vgl. Schiller 1998, S. 29). Gesucht wird folglich ein kurzfristiger Ablaufplan, der gegebene Nebenbedingungen (z. B. begrenzte Ressourcen, Arbeitstakt) einhält und die Zielsetzungen (z. B. hohe Auslastung der Demontagestationen) bestmöglich erfüllt.

3 Modellierung spezifischer Steuerungsmaßnahmen für Demontagelinien

Für die Entwicklung eines neuartigen Demontagesteuerungsverfahrens werden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Es wird eine manuelle und bereits leistungsabgestimmte Demontagelinie (vgl. z. B. Schwarz 2017) mit einem vorliegenden Programm von Alterzeugnissen vorausgesetzt, die in einer definierten Reihenfolge zu demontieren sind. Dieses Auftragsprogramm kann dabei aus unterschiedlichen Varianten eines Alterzeugnistyps mit individuellen Zuständen bestehen. Die Zielsetzung besteht zum einen darin, eine hohe und gleichmäßige Auslastung der Demontagestationen zu gewährleisten. Zum anderen ist der Erlös des eingesteuerten Demontageauftragsprogramms einer definierten Planungsperiode zu maximieren. Im Folgenden werden Steuerungsmaßnahmen entwickelt, mit denen adaptiv-dynamisch auf Störungen bzw. demontagespezifische Schwierigkeiten reagiert werden kann (Abb. 1; vgl. hierzu auch z. B. Zülch et al. 2008, 2010; Zülch und Hrdina 2010a, 2010b).

Bei der Demontage besteht in vielen Fällen eine gewisse Flexibilität bezüglich der Reihenfolge der durchzuführenden Arbeitsvorgänge. Dies ist zum einen auf die gegenüber der Montage geringere Anzahl technologisch bedingter Zwangsfolgen und zum anderen auf eine mögliche Auswahl der einzusetzenden Demontagemethoden und -werkzeuge zurückzuführen. Die Steuerungsmaßnahme *Variation der Demontagevorgangsfolge* muss folglich eine Änderung der ursprünglich geplanten Vorgangsfolge ermöglichen.

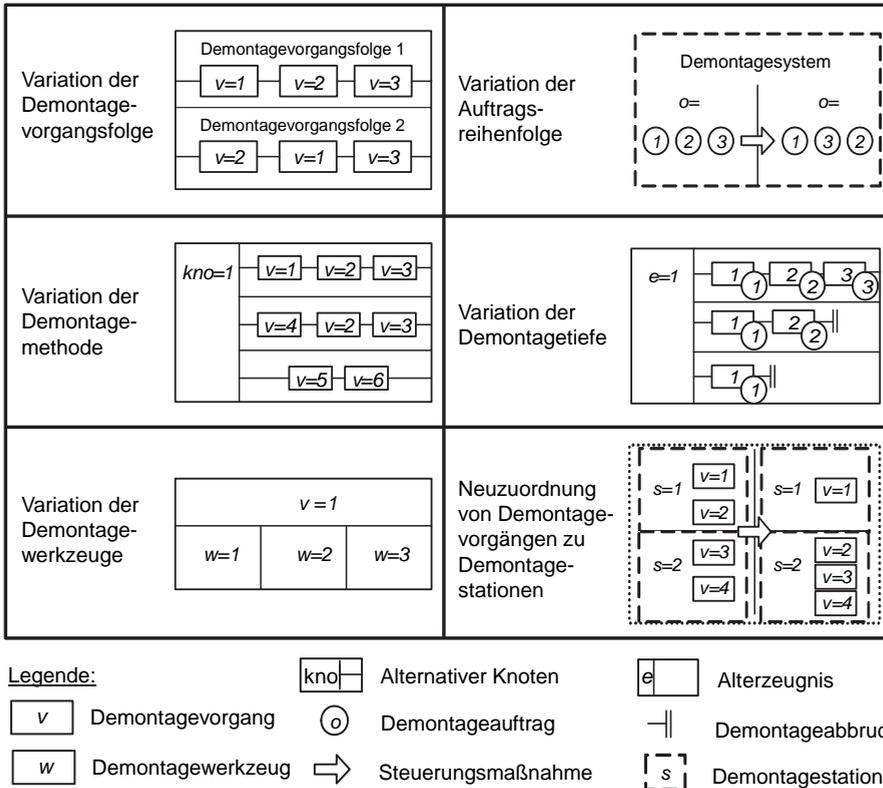


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Maßnahmen zur Demontagesteuerung (vgl. Hrdina 2014, S. 101 ff.)

Darüber hinaus kommen für die Demontage zusätzliche Arbeitsvorgänge in Betracht, die sich nicht allein aus der Alterzeugnisstruktur, sondern sich aus zusätzlichen Erfordernissen und speziellem Wissen ergeben, so z. B. das Reinigen von Komponenten vor ihrer Demontage. Gerade weil solche zusätzlichen Arbeitsvorgänge nicht notwendigerweise, sondern nur bei Bedarf ausgeführt werden, müssen sie als Steuerungsmaßnahme *Variation der Demontagemethode* berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang ist auch eine mögliche *Variation von Demontagewerkzeugen* von Bedeutung. So kann bei einer hohen Auslastung einer Demontagestation von einer zeitaufwendigen, aber zerstörungsfreien zu einer schnelleren, jedoch (teil-)zerstörenden Demontage gewechselt werden, um eine bessere Auslastung des Demontagesystems zu erreichen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass ein Wechsel des Demontagewerkzeuges zu Einschränkungen bei der Wieder- bzw. Weiterverwendung bzw. -verwertung von Komponenten führen kann. Da für eine Demontagetätigkeit (z. B. Trennen einer Schraubverbindung) – egal ob (teil-)zerstörend oder nicht - mehrere Demontagewerkzeuge (z. B. Elektroschrauber statt manueller Schraubendreher) in Frage kommen, werden Werkzeuge modelliert, die dann entsprechend auch die

Demontagemethode implizieren. Huber (2001, S. 181) spricht in diesem Zusammenhang von gleichrangigen und nachrangigen Arbeitsvorgängen.

Je nach Zielsetzung der Demontage ist die Einhaltung einer strikten Reihenfolge der Demontageaufträge nicht unbedingt erforderlich und ermöglicht so eine *Variation der Auftragsreihenfolge*. Diese Flexibilität kann unter Berücksichtigung der bereits eingesteuerten Demontageaufträge genutzt werden, um Abstimmungsverluste in den Demontagestationen zu vermindern.

Um Schwankungen bei der Auslastung einzelner Demontagestationen abzuschwächen, besteht zusätzlich die Möglichkeit einer *Variation der Demontagetiefe*. Abhängig von der Auslastung einer Demontagestation kann situativ entschieden werden, wie weit ein Alterzeugnis demontiert werden soll. Bei hoher Auslastung einer einzelnen Demontagestation lassen sich z. B. die Demontagetiefe und damit der Kapazitätsbedarf an dieser Station verringern. Auf diese Weise kann durch eine verkürzte Demontage verhindert werden, dass an den nachfolgenden Demontagestationen Wartezeiten aufgrund eines Werkstückmangels auftreten. Hierbei sollte man sich vorrangig auf diejenigen Demontagevorgänge konzentrieren, die eine vergleichsweise hohe Wertschöpfung versprechen und fallweise Demontagevorgänge mit einer geringeren Wertschöpfung nicht ausführen.

Im Falle einer geringen Auslastung einer Demontagestation kann hingegen die Demontagetiefe erhöht werden, d. h., es werden Demontagevorgänge durchgeführt, die bei einer Normalauslastung nicht wirtschaftlich wären, mit denen aber dennoch eine, wenn auch relativ geringe Wertschöpfung erzielt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, dynamische Abstimmungsverluste zu verringern, besteht in der *Neuzuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen*. Abhängig von der Auslastung können Demontagevorgänge von einer Station auf eine benachbarte verlagert werden. Hierfür ist die zu Beginn eines Demontageauftrages vorgenommene Zuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen während der Durchführung zu überwachen. Bei drohenden Abstimmungsverlusten kann dann die Zuordnung verändert und an die tatsächlichen Zustände im Demontagesystem respektive an die im Demontagesystem vorliegenden Alterzeugnisse angepasst werden. Diese Steuerungsmaßnahme kann daher vor allem dann eingesetzt werden, wenn vergleichsweise einfache Demontagemethoden angewendet werden und die demontierten Komponenten an dieser Demontagestation für die spätere Wieder- und Weiterverwendung bzw. -verwertung sortiert und in Puffern gesammelt werden können. Zudem können – je nach Zuordnung von Puffern zu Demontagestationen – Demontagevorgänge nur auf diejenigen Stationen verlagert werden, bei denen eine entsprechende Puffermöglichkeit gegeben ist oder, wenn kein Puffer vorhanden ist, die Demontagestationen direkt hintereinander angeordnet sind.

Die genannten Steuerungsmaßnahmen wurden in das bestehende Simulationsverfahren *O_{Sim}* (Objektsimulator) integriert. Daraus entstand dann das Verfahren *O_{Sim}-DPS* (*O_{Sim}* zur Demontageplanung und -steuerung; Hrdina 2014).

4 Verifizierung der Wirksamkeit der Steuerungsmaßnahmen

Im neu entwickelten Demontagesteuerungsverfahrens wird für jede Demontagestation die verbleibende Zeit innerhalb des Arbeitstaktes berechnet. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Steuerungsmaßnahmen wird dann diejenige Folge von Demontagevorgängen ausgewählt, die einerseits die Auslastung der Demontagestation und andererseits den Demontageerlös maximiert. Im Folgenden wird die Wirksamkeit der entwickelten Algorithmen und Steuerungsmaßnahmen an einem Anwendungsbeispiel mit Hilfe der Simulation nachgewiesen.

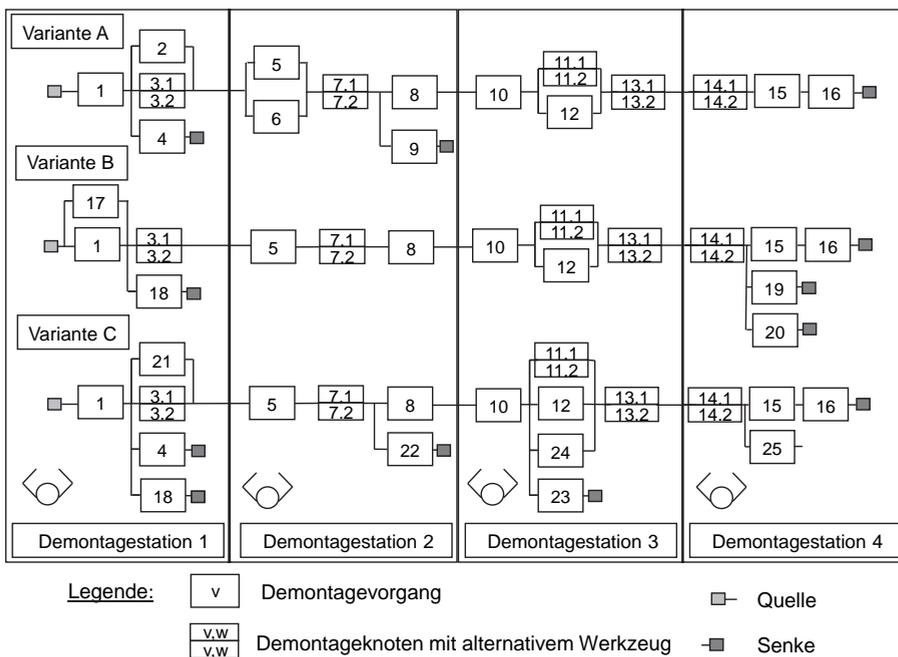


Abbildung 2: Durchlaufpläne der Varianten und Zuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen (vgl. Hrdina 2014, S. 142)

4.1 Ausgangssituation der Simulationsuntersuchung

In einem Demontagebetrieb wird in einer Planungsperiode ein Demontageauftragsprogramm ausgeführt, das aus drei verschiedenen Varianten eines Alterzeugnistyps besteht. Die Alterzeugnisse werden in einer Demontagelinie bestehend aus vier Demontagestationen von jeweils einem Mitarbeiter demontiert. Die Durchlaufpläne der drei Varianten A, B und C gibt Abbildung 2 wieder. Darüber hinaus ist die (statische) Zuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen dargestellt. Dabei werden betaverteilte Tätigkeitszeiten unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Werkzeuge verwendet. Außerdem werden die möglichen Erlöse, die Ausführbarkeitswahrscheinlichkeiten, die

Beschädigungswahrscheinlichkeiten sowie die mit dem jeweiligen Werkzeug verbundene Wahrscheinlichkeit der Wertminderung angesetzt (Tab. 1).

Tabelle 1: Eingangparameter des Simulationsmodells mit alternativen Werkzeugen (nach Hrdina 2014, S. 143f.)

Demontagestation	Knotennummer	Variante	Werkzeug 1						Werkzeug 2							
			min. Dauer	häufigste Dauer	max. Dauer	Erlös	Ausführbarkeitswahrscheinlichkeit	Beschädigungswahrscheinlichkeit	Wertminderung	min. Dauer	häufigste Dauer	max. Dauer	Erlös	Ausführbarkeitswahrscheinlichkeit	Beschädigungswahrscheinlichkeit	Wertminderung
1	1	A, B, C	75	80	85	7	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	A, C	110	120	140	8	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	A, B, C	90	100	105	10	0,8	-	-	65	70	75	10	1,0	0,7	0,7
	4	A, B, C	30	50	60	10	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	B	95	100	105	3	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	B	60	70	120	1	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	C	11	15	17	9	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	5	A, B, C	100	12	140	9	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	A	55	60	66	7	0,7	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	A, B, C	70	80	85	10	0,9	-	-	25	30	35	10	1,0	0,9	0,2
	8	A, B, C	30	35	40	6	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	A, B	5	10	15	2	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	C	55	60	65	2	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	10	A, B, C	70	80	90	7	0,9	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	A, B, C	100	130	140	10	1,0	-	-	90	100	120	10	1,0	0,5	0,5
	12	A, B, C	35	40	50	1	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13	A, B, C	35	40	50	9	0,8	-	-	15	20	25	9	1,0	1	0,5
	23	C	60	65	70	3	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	C	17	20	22	8	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	14	A, B, C	90	100	100	10	0,9	-	-	70	80	90	10	1,0	0,5	0,8
	15	A, B, C	70	80	85	8	0,5	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	A, B, C	65	80	85	8	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	B	15	20	25	1	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	B	15	20	25	4	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	C	15	20	25	3	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

In der Ausgangssituation wählen die Mitarbeiter bei möglichen Ablaufstörungen eine zufällige Steuerungsmaßnahme bzw. zufällig eine alternative Demontagemethode aus. Dieses Szenario wird wie auch die folgenden mit einer Simulationsperiode von 28.800 Sekunden (8 Stunden) durchgeführt. Dabei werden die zu demontierenden Alterzeugnisse in der Reihenfolge Variante A, Variante B, Variante C, Variante A usw. (zyklisch wiederholt) mit der Losgröße 1 eingesteuert. Um eine Zufälligkeit der erzielten Ergebnisse auszuschließen, werden jeweils 10 Simulationsläufe mit unterschiedlichen Zufallszahlenkeimen durchgeführt.

In der Ausgangssituation ist insbesondere Demontagestation 4 mit 77,2 % schlecht, Demontagestation 1 hingegen mit 89,4 % bereits relativ hoch ausgelastet. Ziel des Demontagesteuerungsverfahrens ist es, neben einer Erlösmaximierung auch eine möglichst gleichmäßige Auslastung über alle Demontagestationen hinweg zu erreichen. In der Ausgangssituation beträgt die Differenz zwischen der am höchsten und niedrigsten ausgelasteten Demontagestation 12,2 %. Der erzielte Demontageerlös wird vereinfachend als 1 Geldeinheit (GE) pro erfolgreichen Demontagevorgang ermittelt und beträgt hier 7.854 GE.

4.2 Ergebnisse der Verbesserungslösung

Zur Verbesserung der Ausgangssituation werden die entwickelten Steuerungsmaßnahmen in mehreren Simulationsläufen schrittweise freigegeben. Abbildung 3 zeigt Ausschnitte der Zeitbanddarstellungen der letztlich besten Lösung mit der Ausgangslösung. Anhand der Lücken in den Zeitbändern, also der Wartezeiten der Mitarbeiter bzw. der Leerzeiten der Demontagestationen, lässt sich bereits graphisch der Vorteil der Verbesserungslösung erkennen.

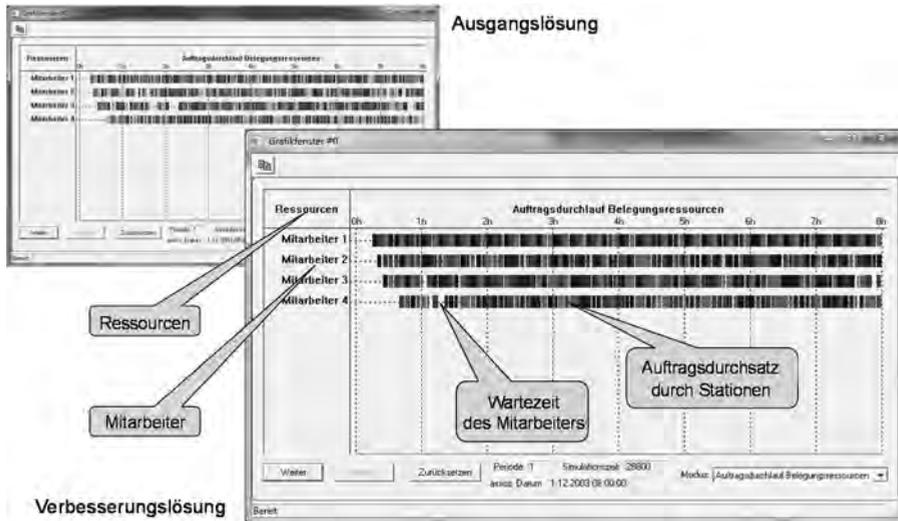


Abbildung 3: Vergleich der Zeitbanddarstellungen von Ausgangs- und Verbesserungslösung (nach Hrdina 2014, S. 146 und 151)

In der Verbesserungslösung können die Mitarbeiter über Puffer auf die Arbeitsinhalte der Vorgänger-Demontagestationen zugreifen und sich dadurch gegenseitig bei der Abarbeitung helfen. Die Ermittlung der Demontageerlöse geschieht, indem eine Neuuzuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen vorgenommen wird und diejenigen Demontagevorgänge gewählt werden, die einen möglichst hohen Demontageerlös versprechen. Durch diese Neuordnung können folgende Ergebnisse erzielt werden: Der erzielte Erlös beträgt nun 8.411 GE, die Differenz zwischen der am höchsten (91,6 %) und niedrigsten ausgelasteten Demontagestation (82,4 %) liegt bei 9,2 %.

4.3 Fazit der Simulationsuntersuchung

Mit Hilfe der durchgeführten Simulationsuntersuchung konnte gezeigt werden, dass die Demontageabläufe mit Hilfe des entwickelten Demontagesteuerungsverfahrens verbessert werden können. Obwohl das System in der Ausgangssituation durch die statische Leistungsabstimmung über alle Demontagestationen hinweg bereits hoch ausgelastet ist (durchschnittlich 83 %) und ein hoher Demontageerlös erzielt wird, kann das System dennoch verbessert werden. Durch den Einsatz der entwickelten Demontagesteuerung lässt sich die

durchschnittliche Auslastung aller Demontagestationen in der Verbesserungslösung auf etwas über 87 % steigern. Die Differenz zwischen der am höchsten und niedrigsten ausgelasteten Demontagestation liegt nun bei etwa 9 %. Der erzielte Erlös steigt um 7 % auf 557 GE. Damit wird die Wirksamkeit des Demontagesteuerungsverfahrens verifiziert. Insbesondere die Kombination aus den entwickelten Steuerungsmaßnahmen kann Demontageabläufe für arbeitsteilige Demontagesysteme verbessert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein reaktives Steuerungsverfahren entwickelt, das es ermöglicht, arbeitsteilige Demontagesysteme so zu steuern, dass ein vorliegendes Auftragsprogramm möglichst wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Hierfür wurden adäquate, der Demontage angepasste Steuerungsmaßnahmen entwickelt und in einem Gesamtkonzept zusammengeführt. Außerdem wurde die Wirksamkeit des Verfahrens unter Beweis gestellt. Damit das Steuerungsverfahren in der Praxis realisiert werden kann, müssen die Steuerungsmaßnahmen den Mitarbeitern in geeigneter Form mitgeteilt werden. Um auf konkrete Situationen reagieren zu können, muss darüber hinaus eine Interaktion zwischen Mitarbeiter und Steuerungsverfahren ermöglicht werden, indem der Mitarbeiter aktuelle Störungen bzw. Demontageschwierigkeiten an das Steuerungsverfahren kommuniziert. Daraufhin erhält er neue Arbeitsanweisungen im Sinne einer aktualisierten Auswahl an zu demontierenden Alterzeugnissen, deren Komponenten sowie einen aktualisierten Arbeitsplan (Dimitrov 2015). Prinzipiell lassen sich zumindest Teile des hier entwickelten Demontagesteuerungsverfahrens auch auf andere Teilefertigungs- und Montagesysteme übertragen, für die wegen ihrer Störanfälligkeit eine reaktive Steuerung sinnvoll ist. Ein derartiges Störungsmanagement erfordert dann jedoch ein aktuelles Zustandsmodell des zu steuernden Fertigungssystems (siehe z. B. Kleiner 2017). Ob sich daraus eine vorausschauende Fertigungssteuerung entwickeln wird (so z. B. o. V. 2013), bleibt allerdings abzuwarten.

Literatur

- Boks, C.B.: The relative importance of uncertainty factors in product end-of-life scenarios: A quantification of future developments in design, economy, technology and policy. Dissertation, Universität Delft, 2002.
- Dimitrov, T.: Permanente Optimierung dynamischer Probleme der Fertigungssteuerung unter Einbeziehung von Benutzerinteraktionen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2015.
- Geiger, D.; Zussmann, E.; Lenz, E.: Probabilistic reactive disassembly planning. *Annals of the CIRP* 45 (1996) 1, S. 49-52.
- Grochowski, D.E.; Tang, Y.: A machine learning approach for optimal disassembly planning. *Journal of Computer Integrated Manufacturing* 22 (2009) 4, S. 374-383.
- Heinz, K.; Mönig, O.; Schwarz, R.; Zülch, G.: Zeitermittlung für die manuelle Demontage. *REFA-Nachrichten* 55 (2002) 4, S. 15-18.
- Hrdina, J.: Beitrag zur Steuerung von arbeitsteiligen Demontagesystemen. Aachen: Shaker 2014.

- Kim M.H.; Harms, R.; Seliger, G.: Automatic Control Sequence Generation for a Hybrid Disassembly System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 4 (2007) 2, S. 194-205.
- Kleiner, N.: BigPro - Einsatz von Big Data-Technologien zum Störungsmanagement in der Produktion. <https://www.fzi.de/forschung/projekt-details/bigpro-einsatz-von-big-data-technologien-zum-stoerungsmanagement-in-der-produktion/>.
Letzter Zugriff am 21.04.2017.
- o. V.: Vorausschauende Fertigungssteuerung. *IT & Production*, 04.11.2013. <http://www.it-production.com/allgemein/predictability-in-der-halbleiter-industrievorausschauende-fertigungssteuerung/print/>.
Letzter Zugriff am 21.04.2017.
- Schiller, E.F.: Ein Beitrag zur adaptiv-dynamischen Arbeitsplanung in der Demontage. Aachen: Shaker 1998.
- Schwarz, R.: Ein Beitrag zur Leistungsabstimmung von Demontagesystemen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2017 (im Druck).
- Seliger, G.; Uhlmann, E.; Friedrich, T. et al.: Hybrid Disassembly System. In: Seliger, G. (Hrsg.): *Recovery of Resources in Product and Material Cycles*. Berlin, Heidelberg: Springer 2007, S. 237-253.
- Zülch, G.; Hrdina, J. (2010a): Control of Disassembly Systems Based on the Division of Labour by Means of Dynamically Adapting Routing Plans. In: Dangelmaier, W. et al. (Hrsg.): *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 396-407.
- Zülch, G.; Hrdina, J. (2010b): A new Approach for Controlling Disassembly Systems. In: Sihn, W.; Kuhland, S. (Hrsg.): *Sustainable Production and Logistics in Global Networks*. Wien, Graz: Neuer Wissenschaftlicher Verlag 2010, S. 228-235.
- Zülch, G.; Hrdina, J.; Schwarz, R.: Development of a Computer Aided Procedure to Control Division of Labour Based Disassembly Systems. In: Mitsubishi, M.; Ueda, K.; Kimura, F. (Hrsg.): *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. London: Springer 2008, S. 217-220.
- Zülch, G.; Hrdina, J.; Schwarz, R.: Disassembly – Not the Reverse of Assembly. In: Grubbström, R.W.; Hinterhuber, H.H. (Hrsg.): *Sixteenth International Working Seminar on Production Economics*, Innsbruck, 2010. Pre-prints, Volume 1, S. 543-554.
- Zülch, G.; Schwarz, R.: Planning and Balancing of Disassembly Systems. In: Koch, T. (Hrsg.): *Lean Business Systems and Beyond*. New York NY: Springer 2008, S. 325-330.

Evakuierungssimulation von Kreuzfahrtschiffen

Evacuation Simulation of Cruise Ships

Jan-Dirk Meyer, Jens Klußmann, Hochschule Emden/Leer, Leer (Germany),
jan-dirk.meyer@hs-emden-leer.de, jens.klussmann@hs-emden-leer.de

Abstract: This document deals with the topic of the evacuation simulation of cruise ships. The purpose of the evacuation simulation is to identify key figures such as the duration of the evacuation and waiting times. Using a 3D evacuation simulation, bottlenecks and obstacles can be evaluated more precise. With regard to the evacuation of disabled passengers, a subsequent evaluation of bottlenecks by Virtual Reality (VR) has been considered. Finally, user experiences are analyzed and the advantages of VR in relating to evacuation simulations are shown.

1 Einleitung

Die Evakuierung eines Schiffes kann durch verschiedene Ursachen notwendig werden. Diese sind Verlust der Stabilität des Schiffes, Feuer an Bord, Kollisionen, Grundberührungen oder ungünstige Wetterbedingungen. Mindestanforderungen, die Schiffe hinsichtlich Bauweise, Ausrüstung, Betrieb und Sicherheit erfüllen müssen, sind in der International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS 1974), und in den von der International Maritime Organisation (IMO) erlassenen Bestimmungen geregelt. Demnach müssen Rettungsboote auf allen Schiffen innerhalb von 30 Minuten nach dem Signal zum Verlassen des Schiffes Passagiere aufnehmen und zu Wasser gelassen werden können. Seit einigen Jahren wird schon bei der Konstruktion von neuen Kreuzfahrtschiffen eine komplette Evakuierung eines Kreuzfahrtschiffes innerhalb von 80 Minuten angestrebt (Beste et al. 2012). Wie wichtig eine rechtzeitige und schnelle Evakuierung ist, zeigt das Negativbeispiel der Costa Concordia, welches am 13. Januar 2012 vor der Insel Giglio im Mittelmeer mit einem Felsen kollidierte, Leck schlug und schließlich vor der Insel auf Grund lief und mit der Zeit auf 65 Grad Schlagseite kippte. Durch eine zu späte Alarmierung und Durchführung von Evakuierungsmaßnahmen verloren schließlich 32 Passagiere ihr Leben.

Als Zielsetzung einer Evakuierungssimulation ist zu untersuchen, ob die gesetzlichen Vorgaben bezüglich einer Evakuierung eines Kreuzfahrtschiffs in der vorgegeben Zeit erfüllt werden können. Hierzu werden in der Simulation Kennzahlen wie beispielsweise die benötigte Zeitdauer der Passagiere vom Ausgangspunkt der Kabine über die z. T. verzweigten Gänge und Treppen bis zum

ersten Sammelpunkt und die benötigte Zeitdauer der Passagiere bis zu den Rettungsbooten ermittelt. Weitere Kennzahlen sind die Identifikation auftretender Wartezeiten der Passagiere, die durch Engpässe beispielsweise Treppen auftreten können. Hierbei ist es wichtig, dass das Verhalten der Menschen während einer Evakuierungssituation angemessen abgebildet wird und die altersgruppenabhängigen Reaktionen und Bewegungsmuster berücksichtigt werden. Für die Evakuierungssimulation wurde ein 3D-Decksmodell des Kreuzfahrtschiffs der Norwegian Escape modelliert und mittels des Simulationstools Plant Simulation (Siemens 2017) untersucht.

Bei der Betrachtung mobilitätseingeschränkter Personen, z. B. Rollstuhlfahrer, sind Aspekte des benötigten Raumbedarfs in einer Evakuierungssimulation angemessen zu berücksichtigen. Um diese Aspekte abzubilden, wurde das Simulationsmodell durch eine 3D-Visualisierung ergänzt. Verschiedene Schiffmodelle bzw. Teile davon, wie z. B. Flure und Treppenbereiche, sind als 3D-Modell konstruiert worden. Die Evaluation der 3D-Modelle unter dem Gesichtspunkt der besonderen Anforderungen von mobilitätseingeschränkten Personen in einer Evakuierungssituation erfolgte in der VR-Corner-CAVE des Fachbereichs Seefahrt der Hochschule Emden/Leer.

2 Stand der Technik

Die Simulation von Produktions- und Logistikprozessen ist bereits seit vielen Jahren in diversen Bereichen der Industrie etabliert (Klußmann et al. 1996; Steinhauer 2006). Auch im Schiffbau, der durch Klein- bzw. Kleinstserien gekennzeichnet ist, werden diskrete Simulationsmodelle beispielsweise in der Schiffsendmontage eingesetzt (Steinhauer 2016). Die Analyse von Evakuierungen von Kreuzfahrtschiffen ist in SOLAS (1974) und ergänzenden Richtlinien der IMO geregelt. Evakuierungssimulationen als Spezialfall von Personenflusssimulationen werden bereits seit einigen Jahren von namhaften Softwarewerkzeugen wie AnyLogic, Enterprise Dynamics und AENEAS unterstützt. Das Unternehmen AnyLogic führt hierbei Simulationsstudien zur Passagierflusssimulation am Frankfurter Flughafen oder zur Analyse von Menschenmengen am Eiffelturm auf (AnyLogic Europe 2017). Die Softwarelösung Pedestrian Dynamics des Unternehmens INCONTROL bietet explizit Evakuierungssimulation von Kreuzfahrtschiffen an (INCONTROL 2017). Auch das Unternehmen TraffGo HT bietet Evakuierungssimulation von Kreuzfahrtschiffen mit ihrer Softwarelösung AENEAS an (TraffGo 2017).

Die Evakuierung von Kreuzfahrtschiffen und die Evakuierung von Gebäuden ähneln sich sehr. Im Vergleich zu der Evakuierung von Gebäuden ist die Besonderheit der Schiffsbewegung und daraus resultierende verminderte Gehgeschwindigkeiten der Passagiere zu beachten (Bles et al. 2002).

Durch die stetige Weiterentwicklung von Simulationssoftware und technischen Komponenten ist die Möglichkeit der 3D-Visualisierung in den letzten Jahren gestiegen. Trotz der gegebenen technischen Voraussetzungen hat sich das Thema der 3D-Visualisierung bis heute aber nicht etablieren können und scheint nur ein geringes Maß an Wichtigkeit zu haben (Schmitz und Wenzel 2013). Dabei öffnet die 3D-Visualisierung viele neue Möglichkeiten. Hierbei kann die 3D-Visualisierung nicht nur bei Präsentationen ihre Stärken ausspielen, sondern sie kann dazu beitragen, die Evakuierung von Personen auf einem Kreuzfahrtschiff aus einem

völlig neuen Blickwinkel zu betrachten, um somit bereits vor Produktionsbeginn Engpässe zu erkennen, und bietet damit die Möglichkeit noch in der Planungsphase Modifikationen vorzunehmen. Aufgrund der rasanten Entwicklung in der IT- und Computerbranche rückt die Nutzung von Virtual Reality (VR) immer weiter in den Fokus. Mit Hilfe von VR kann die 3D-Visualisierung weiter verstärkt werden und Mitarbeitern aus anderen Bereichen des Unternehmens der Zugang zu komplexen Daten ermöglicht werden (Lukas et al. 2005). Auch in der Schifffahrt wird verstärkt VR eingesetzt (Klußmann 2017). Die Nutzung von VR für „virtuelle“ Schiffsrundgänge ist bereits eine gängige Methode zur Repräsentation von Schiffsmodellen, jedoch ist die visuelle Untersuchung im Hinblick auf die Barrierefreiheit in Zusammenhang mit der Evakuierungssimulation ein Novum. In Abbildung 1 ist als virtuelles Schiffsmodell die Titanic nachgebildet, die im Unterricht am Fachbereich Seefahrt eingesetzt wird, um die Studierenden in den neuen VR-Technologien auszubilden.

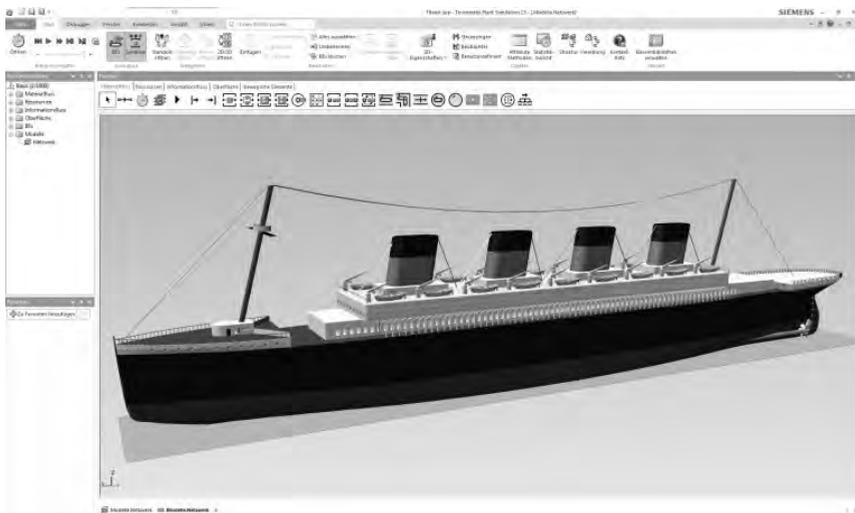


Abbildung 1: Virtuelles Schiffsmodell der Titanic in Plant Simulation

Die visuelle Untersuchung in Kombination mit einem mobilitätseingeschränkten Menschenmodell bietet die Möglichkeit, im Vorfeld Engpässe zu identifizieren und Erreichbarkeiten von ausgewählten Bereichen zu analysieren.

3 Simulation und Modellierungsaspekte

Um die Evakuierung eines Kreuzfahrtschiffes realistisch in einer Simulation darstellen zu können, ist es wichtig, zunächst das Verhalten der Personen an Bord zu betrachten. Internationale Vorgaben für die Evakuierungssimulation von Kreuzfahrtschiffen finden sich in den „Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships“, die von der IMO bereitgestellt werden (MSC.1/Circ.1238 2007). Diese Richtlinien stellen ebenfalls eine analytische Methode zur Berechnung der Evakuierungsdauer eines Kreuzfahrtschiffes bereit. Dabei werden blockierte Wege und andere Störfälle in dieser Betrachtungsweise

lediglich durch einen Sicherheitsfaktor abgebildet. Aufgrund der Weiterentwicklung der Simulationssoftware in den letzten Jahren ist es möglich, solche Störungen in der Simulation zu berücksichtigen und genauer darzustellen. Nachfolgend soll die Evakuierung eines Kreuzfahrtschiffes mittels der Simulationssoftware Plant Simulation untersucht werden. Hierbei werden die Passagiere anhand von Werkern dargestellt und die Zeitdauer der Evakuierung und Wartezeiten der Passagiere ermittelt und mit den Vorgaben der IMO verglichen.

3.1 Modellierungsvorgaben

Um eine sichere Evakuierung eines Kreuzfahrtschiffes gewährleisten zu können, ist es wichtig zu verstehen, wie die Passagiere auf einen Notfall reagieren und wie sie sich bei einer Evakuierung verhalten, da der Faktor Mensch bei einem Seeunfall maßgeblich den Ablauf des Notfalls bestimmt (Hahne 2012). Vorgaben und statistische Annahmen zu Reaktionszeiten oder Geschwindigkeiten der Passagiere sind in den IMO-Richtlinien dokumentiert. Demnach ist beispielsweise die demografische Zusammensetzung auf einem Kreuzfahrtschiff gemäß Tabelle 1 und die Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Personengruppen gemäß Tabelle 2 verteilt.

Tabelle 1: Tabelle über die demographische Zusammensetzung der Passagiere (MSC.1/Circ. 1238 2007)

Demographische Gruppe – Passagiere	%-Anteil
Frauen, jünger als 30 Jahre	7
Frauen, zwischen 30-50 Jahre	7
Frauen, älter als 50	16
Frauen, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 1	10
Frauen, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 2	10
Männer, jünger 30 Jahre	7
Männer, zwischen 30-50 Jahre	7
Männer, älter als 50	16
Männer, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 1	10
Männer, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 2	10
Demographische Gruppe – Crew	%-Anteil
Frauen	50
Männer	50

Dabei ist zu beachten, dass Hindernisse wie z. B. Türen die Geschwindigkeiten um ein Viertel reduzieren. Hierfür sind separate Tabellenwerke vorhanden. Neben der Geschwindigkeit der Passagiere sind auch deren Geduld und Reaktionszeit für die Simulation entscheidend. Mit Geduld ist z. B. gemeint, wie lange eine Person wartet, bis sie sich bei einer Stauung einen neuen Weg sucht. Mit der Reaktionszeit ist beispielweise die Zeit gemeint, die eine Person benötigt, um auf einen Alarm zu reagieren.

Tabelle 2: Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Passagiergruppen
(MSC.1/Circ. 1238 2007)

Demographische Gruppe - Passagiere	Gehgeschwindigkeit in m/s			
	Aufwärts		Abwärts	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Frauen, jünger als 30 Jahre	0,56	0,94	0,47	0,79
Frauen, zwischen 30-50 Jahre	0,49	0,81	0,44	0,74
Frauen, älter als 50	0,45	0,75	0,37	0,61
Frauen, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 1	0,34	0,56	0,28	0,46
Frauen, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 2	0,29	0,49	0,23	0,39
Männer, jünger als 30 Jahre	0,76	1,26	0,5	0,84
Männer, zwischen 30-50 Jahre	0,64	1,07	0,47	0,79
Männer, älter als 50	0,5	0,84	0,38	0,64
Männer, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 1	0,28	0,64	0,29	0,49
Männer, älter als 50 und eingeschränkt Mobil Stufe 2	0,33	0,55	0,25	0,41
Demographische Gruppe – Crew	Gehgeschwindigkeit in m/s			
	Aufwärts		Abwärts	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Frauen	0,56	0,94	0,47	0,79
Männer	0,76	1,26	0,5	0,84

Diese Zeiten wiederum sind je nach Uhrzeit abhängig und betragen tagsüber 0 bis 300 Sekunden und nachts zwischen 400 und 700 Sekunden.

3.2 Simulationsmodell

Als Simulationstool wurde wie bereits erwähnt Plant Simulation verwendet. Hierbei wurde in einem ersten Versuch der Grundriss eines Schiffsdecks zunächst mittels Unternetzwerken in mehrere Zellen aufgeteilt (siehe Abb. 2). Eine Zelle entspricht dabei der wissenschaftlich ermittelten Standfläche einer Person im dichten Gedränge von $0,16 \text{ m}^2$ und kann somit auch nur von jeweils einem Passagier zu einem bestimmten Zeitpunkt betreten werden.

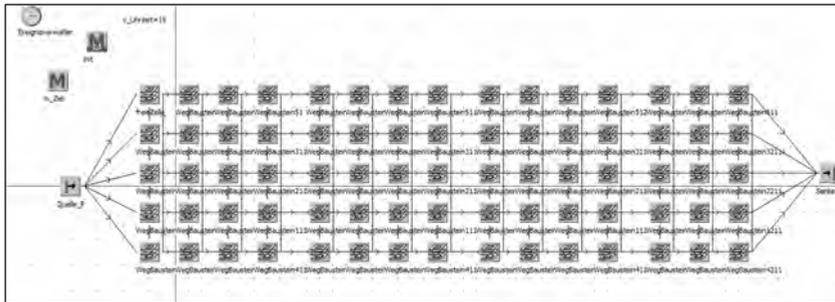


Abbildung 2: Darstellung des Schiffsdecks mit Unternetzwerken als Zellen

Eine Zelle ist dabei wie in Abbildung 3 dargestellt aufgebaut. Die Wege in den Zellen stellen deren Begrenzung dar. Die Uhrzeit, an dem der Alarm beginnt, wird hierbei von der Simulation ausgewürfelt. Über Zufallskomponenten werden beim Austritt der Personen Parameter, wie z. B. Alter, Geschwindigkeit und Geschlecht, automatisch bestimmt und übergeben. Ziel ist es, die durchschnittliche Zeitdauer und Spitzen zu ermitteln und Engpässe an bestimmten Stellen im Schiff zu identifizieren.

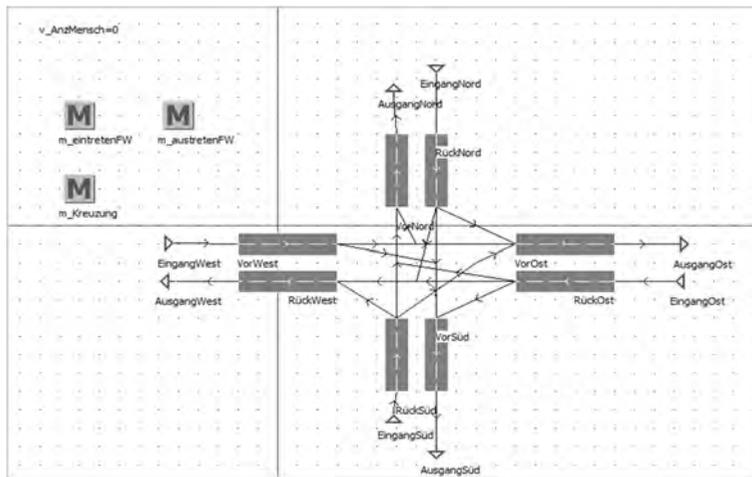


Abbildung 3: Darstellung des Aufbaus einer Zelle in Plant Simulation

Mit dem neuen Release für Plant Simulation sind Werker nicht mehr an Fußwege gebunden und können sich nun frei im Raum bewegen. Zu den neuen Funktionen gehört außerdem das automatische Erkennen von Hindernissen (Maschinen und Objekte) und benutzerdefinierten Sperrflächen. Zudem werden die Geschwindigkeiten der Werker bei Benutzung von Treppen automatisch angepasst. Für den zweiten Versuch der Evakuierungssimulation wurde daraufhin zunächst ein 3D-Schiffsmodell entwickelt. Die 3D-Decksmodelle wurden mit dem 3D-Tool SketchUp (Trimble 2017) entwickelt und in Plant Simulation importiert. Abbildung 4 zeigt das erstellte 3D-Decksmodell, welches für die Evakuierungssimulation verwendet wurde.

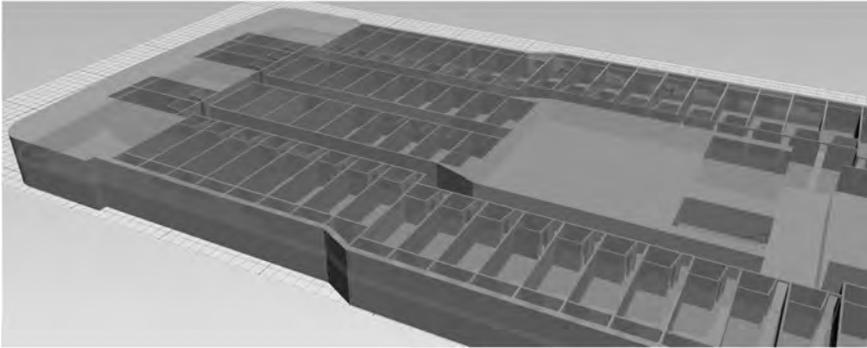


Abbildung 4: 3D-Schiffsdeck für die Evakuierungssimulation in Plant Simulation

Die Uhrzeit des Alarms und die gewählten Parameter sind gemäß des ursprünglichen Modells generiert worden. Mittels Sperrflächen wurde der Grundriss des Decks nachmodelliert und somit Fluchtwege für die Passagiere vorgegeben. In dem simulierten Szenario wurde eine bestimmte Anzahl von Passagieren aus ihren Kabinen zu einem Evakuierungsplatz auf ein höher gelegenes Deck geschickt und hierbei die Zeitdauer für die Evakuierung gemessen. Die individuell gemessenen Zeiten sind dabei in einer Tabelle für den jeweiligen Passagier abgespeichert worden. Zudem ist eine Detaillierung der Wartezeiten, die bedingt durch Staus vor Treppen oder durch Engpässe aufgetreten sind, vorgenommen worden. Gruppendynamische Ereignisse wie z. B. das Verhalten bei plötzlichem Auftreten von Hindernissen sind durch Methoden realisiert worden. Bedingt dadurch, dass die exakte Position der Passagiere in einem bestimmten Zeitintervall abgefragt wurde, konnte bei Auftreten eines Hindernisses den Passagieren ein neues Ziel zugeordnet und somit verhindert werden, dass die Passagiere durch das Hindernis hindurch laufen. Mobilitäts-eingeschränkte Passagiere, wie z. B. Rollstuhlfahrer, wurden in der Simulation durch entsprechende Grafiken und angepasste Geschwindigkeiten dargestellt.

Da die mobilitätseingeschränkten Personen im Wesentlichen nur durch eine geringere Geschwindigkeit abgebildet wurden, ist eine zusätzliche Untersuchung des Raumbedarfs eines Rollstuhlfahrers anhand eines 3D-Modells in der VR betrachtet worden. Hierzu wurden Schiffskabinen und Fluchtwege genauer untersucht.

4 Barrierefreiheit auf Kreuzfahrtschiffen

Für die barrierefreie Gestaltung an Bord gibt es keine einheitlich verpflichtenden Vorschriften. Gemäß Richtlinie 2009/45/EG (2009) muss lediglich gewährleistet sein, dass mobilitätseingeschränkte Personen gefahrlos Fahrgastsschiffe betreten können. Zudem gibt es auf internationaler Ebene Richtlinien wie beispielsweise ECE/TRANS/SC.3/188 (2010) der United Nation oder den Code of Practice der kanadischen Behörde. Dort finden sich beispielsweise Vorgaben für die Gestaltung von Fluren, Aufzügen und Waschräume. Beim Vergleich der Richtlinien zeigen sich gewisse Parallelen zu den deutschen DIN-Normen. Da die Richtlinien einen eher empfehlenden Charakter haben und es keine einheitlichen Vorschriften zum barrierefreien Bauen an Bord gibt, ist es notwendig die Barrierefreiheit im Hinblick auf ein Evakuierungsszenario zu untersuchen. Hier kann die 3D-Simulation und Visualisierung in Kombination mit VR ihre Stärken ausspielen.

4.1 Einsatz virtueller Schiffsmodelle in der VR-Corner-CAVE

Die erstellten 3D-Modelle sind in dem VR-Corner-CAVE-System des Fachbereichs Seefahrt getestet worden. Das VR-System besteht aus zwei Seitenprojektionen in den Größenabmessungen von 3,60 m Breite und 2,0 m Höhe und einer Bodenprojektion in der gleichen Dimension. Die Projektoren haben jeweils eine Full HD Auflösung von 1920*1080 Pixel. Die VR-Corner-CAVE verfügt über ein markerbasiertes Tracking-System, bestehend aus drei Infrarotkameras zur Positionsbestimmung und einer 3D-Brille zur blickpunktabhängigen Bildgenerierung. Für die Steuerung in der Szene wird ein Flystick oder alternativ ein Xbox-Controller verwendet.

Für die Untersuchung der Barrierefreiheit und den Raumbedarf von mobilitätseingeschränkten Personen auf Kreuzfahrtschiffen während einer Evakuierung wurden zunächst 3D-Modelle erstellt, die besondere Anforderungen im Hinblick auf die Barrierefreiheit aufweisen. Für die Untersuchung wurde exemplarisch eine einzelne Kabine und Fluchtwege des Kreuzfahrtriesen „Norwegian Escape“ modelliert. Für die Erstellung der dreidimensionalen Modelle wurde auf die Software SketchUp (Trimble 2017) zurückgegriffen. Sie hat den Vorteil, dass bereits nach kurzer Einarbeitungszeit sehr anschauliche 3D-Modelle erstellt werden können. Da bei der Erstellung der 3D-Modelle nicht auf Originalpläne zurückgegriffen werden konnte, wurden die auf der Norwegian Cruise Line Webseite veröffentlichten Skizzen verwendet. Das Interieur wurde über die Onlinebibliothek „3D-Warehouse“ von SketchUp in das Modell eingepflegt.

Beispiel Fluchtweg: Die Fluchtwege wurden gemäß DIN-Normen und IMO-Richtlinien gestaltet, entsprechende Maße wurden eingehalten. Anschließend wurde das Modell mittels VR auf Barrierefreiheit und Engpässe untersucht. Abbildung 5 zeigt einen Rollstuhlfahrer bei der Benutzung eines Fluchtweges im Brandfall.



Abbildung 5: Darstellung eines Rollstuhlfahrers bei der Benutzung eines Fluchtweges in SketchUp

4.2 Praktische Erfahrungswerte

Die Nutzbarkeit der virtuellen Schiffsmodelle beruht auf Erfahrungen von Studierenden in mehreren Vorlesungen. Diverse Testszenarien wurden in der VR-Corner-CAVE durchgespielt und anschließend über einen Fragebogen ausgewertet. Infolge des hohen „Immersionsgrades“, Eintauchen in das virtuelle Modell, konnten sich die Studierenden einen realitätsnahen Überblick der Räumlichkeiten verschaffen und sich besser in die Rolle des Rollstuhlfahrers hineinversetzen. Die Steuerung in der Szene wurde mit einem Flystick durchgeführt. Hier hat sich gezeigt, dass sich der Nutzer zunächst an die Steuerung des Flysticks gewöhnen muss, bis eine sichere Handhabung gewährleistet ist. Ebenfalls sind bei wenigen Nutzern Symptome der Simulatorkrankheit „Simulator Sickness“, wie z. B. Übelkeit und Unwohlsein, aufgetreten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Evakuierungssimulation anhand eines 3D-Simulationsmodells und die anschließende Betrachtung und Untersuchung der Barrierefreiheit und Engpässe mittels VR eine zusätzliche Unterstützung im Bewertungsprozess und Analyse bei der Evakuierung von Kreuzfahrtschiffen bietet. Es hat sich gezeigt, dass das Eintauchen in die virtuelle Welt die Wahrnehmung des Betrachters verstärkt und die Beurteilung der Simulationsergebnisse aus völlig neuen Blickwinkeln ermöglicht. So wird dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, sich in die Rolle des Passagiers einzufühlen und die Szene aus dessen Sicht zu erleben. Zudem kann die Analyse der Barrierefreiheit mittels VR bereits in der Planungs- und Entwicklungsphase eingesetzt werden und somit zu einer Früherkennung von Problemen beitragen, was wiederum zu einer Vermeidung von hohen Umbaukosten im Nachhinein führt. Abschließend ist zu sagen, dass die barrierefreie Gestaltung mittels VR ein Zugewinn im Konstruktionsprozess von Kreuzfahrtschiffen ist und zur Kostenreduzierung durch Vermeidung von nachträglichen Änderungen beiträgt. Zur weiteren Steigerung des Immersionsgrades kann die Interaktion mit Gegenständen im Modell führen. Für zukünftige Untersuchungen ist beispielsweise das Greifen von Gegenständen für die Analyse von Erreichbarkeiten anzustreben.

Literatur

- 2009/45/EG: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Mai 2009 über Sicherheitsvorschriften und -normen für Fahrgastschiffe, Amtsblatt der Europäischen Union L 163/1 2009.
- AnyLogic Europe: Fallbeispiele. http://www.anylogic.de/case-studies/?TAGS=pedestrian-traffic-flows&NUMBER_TAGS=278. Letzter Zugriff am 25.07.2017.
- Beste, D.; Friedl, C.; Kälke, M.; Kürten, L.; Müllges, K.: Maritime Erfolgsgeschichten – Forschung für Schifffahrt und Meerestechnik. (Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich, Hrsg.). Bonn: Brandt GmbH 2012.
- Bles, W.; Nooy, S.; Boer, L. C.: Influence of Ship Listing and Ship Motion on Walking Speed. In: Schreckenberg, M.; Sharma, S.D. (Hrsg.): Pedestrian and evacuation dynamics. Berlin, New York: Springer 2002, S. 437-452.

- Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P.; Jung, B.: Virtual und Augmented Reality (VR/AR). Berlin, Heidelberg: Springer 2013.
- Dörr: Das Fahrgastschiff für behinderte Mitbürger. Das Schiff für den Passagier. In: Wietasch, K.W. (Hrsg.): Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik, Duisburg 1989, S. 45-60.
- ECE/TRANS/SC.3/188, Guidelines for passenger vessels also suited for carrying persons with reduced mobility. New York and Geneva: United Nations 2010.
- Hahne, J. (Hrsg.): Handbuch Schiffssicherheit: Erkennen, Bewerten, Entscheiden, Handeln. Hamburg: Seehafen-Verlag 2012.
- INCONTROL Simulation Solutions: Crowd Management. <http://www.incontrolsim.de/application-area/crowd-management/#cruise-ships>. Letzter Zugriff am 25.07.2017.
- Klußmann, J.: Fachvortrag: Evakuierungssimulation auf Kreuzfahrtschiffen mittels Virtual Reality. VR/AR-Symposium - Augmented und Virtual Reality im Produktlebenszyklus. Heidelberg 2017, S. 5-7.
- Klußmann, J.; Krauth, J.; Splanemann, R.: Simulation - Spielerei oder zukunftsweisende Technik? wt-Produktion und Management 86 (1996)7/8, S. 361-366.
- Lukas, U. von; Schulte, G.; Hayka, H.; Scheller, M.; Wolf, A.: InViS - Integrierter Virtueller Schiffbau. In: Lukas, U. von (Hrsg.): Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e. V. (ZGDV): Integrierter Virtueller Schiffbau. Workshop: Dokumentation zum Workshop. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2005, 14 S.
- MSC.1/Circ.1238, Guidelines for evacuation analysis for the new and existing passenger ships. IMO: London 2007.
- Schmitz, M.; Wenzel, S.: Die 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation – Stellenwert und Entwicklungstendenzen. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2013. Paderborn: W.V. Westfalia Druck GmbH 2013, S. 373-383.
- Siemens AG: Plant Simulation. <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml>. Letzter Zugriff am 25.07.2017.
- SOLAS: Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its protocol of 1988: articles, annexes and certificates; incorporating all amendments in effect from 1 July 2014. International Maritime Organization. London: IMO 2014.
- Steinhauer, D.: Simulation im Schiffbau – Unterstützung von Werftplanung, Produktionsplanung und Produktentwicklung bei der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. Tagungsband zur 12. ASIM-Fachtagung (2006). San Diego: SCS Publishing House e. V., S. 1-14.
- Steinhauer, D.: STS Library for Complex Assembly and Logistics – New Version 10.1. Fachvortrag: 3rd Tecnomatix Plant Simulation Worldwide User Conference 2016. Stuttgart 2016, S. 3-6.
- TraffGo HT GmbH: AENEAS. <http://www.traffgo-ht.com/de/pedestrians/products/aeneas/index.html>. Letzter Zugriff am 25.07.2017.
- Trimble Navigation Ltd.: SketchUP. <https://www.sketchup.com/de>. Letzter Zugriff am 25.07.2017.

Mobile Lernumgebung zur simulativen Gestaltung von Produktionssystemen

Mobile Learning Environment for the Simulation-supported Design of Production Systems

Bastian C. Müller, Günther Seliger, TU Berlin, Berlin (Germany),
mueller@mf.tu-berlin.de, seliger@mf.tu-berlin.de

Markus Kühn, Moritz Schele, UNITY AG, Berlin (Germany),
markus.kuehn@unity.de, moritz.schele@unity.de

Abstract: Throughout the years, the discrete-event simulation has proven to be a powerful decision support tool in the target system of minimizing throughput time, minimizing due date deviation, maximizing capacity utilization and minimizing inventory. However, prior knowledge, required for the use of software tools, is an obstacle in the wide use of software packages. A mobile learning environment for the simulation-supported design of production systems is presented. It is shown how a software tool can be learned by consultants and students, considering motivation as a conducive factor.

1 Einleitung

Bei der Neu- und Umplanung von Produktionssystemen ist es attraktiv, möglichst viele Alternativen in kurzer Zeit zu analysieren. Die ereignisdiskrete Simulation hat sich über viele Jahre als ein Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung im Zielsystem von Durchlaufzeitminimierung, Terminabweichung, Auslastungsmaximierung und Bestandsminimierung bewährt (VDI 3633 Blatt 1 2014). Allerdings sind Vorkenntnisse, welche für die Nutzung handelsüblicher Software erforderlich sind, ein Hindernis in der breiten Verwendung von Simulationsinstrumenten. Der vorliegende Beitrag zeigt Wege auf, wie Nutzer motiviert an den Einsatz von Simulationsinstrumenten zur Lösung von Planungsaufgaben herangeführt werden können.

Im Folgenden ist relevante Literatur mit Blick auf die Heranführung an Simulationsinstrumente analysiert. Eine Lernumgebung zur simulativen Gestaltung von Produktionssystemen ist daraufhin konzipiert. Die Beschreibung der prototypischen Umsetzung und einer Studie mit Beratern und Studierenden im Hinblick auf die Motivation und Lernförderlichkeit der Lernumgebung schließen den Beitrag ab.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Unerfahrene Anwender ereignisdiskreter Simulationsinstrumente lassen sich durch das Lösen von Fallstudien an die Nutzung spezifischer Instrumente heranführen. Beispielsweise veröffentlichten Bangsow (2015) und Eley (2012) umfangreiche Sammlungen, die ein Selbststudium eines spezifischen Instruments ermöglichen. Erklärungen und Diskussionen beispielhafter Lösungen sind oft abgedruckt. Solche Fallstudien können auch begleitend in Lehrveranstaltungen an Hochschulen sowie durch Simulationsdienstleister zur Schulung von Kunden genutzt werden.

Insbesondere junge Lernende erwarten jedoch zunehmend attraktive Lernangebote, auf die orts- und zeitunabhängig zugegriffen werden kann. Um die Aufmerksamkeit junger Lernender zu erhalten, scheinen mobile spielerische Ansätze geeignet zu sein. Padilla et al. (2016) beschreiben in diesem Kontext einen ersten Ansatz. Vor dem Hintergrund der Heranführung neuer Nutzer an das Simulationsinstrument ClouDES beschreiben sie den Einsatz von Simulationsspielen als eine zunächst unterhaltsame Lernaktivität. Bei ClouDES handelt es sich um einen Ansatz der Online-Simulation (Padilla et al. 2014). Die Benutzeroberfläche ist plattformunabhängig gestaltet und lässt sich im Webbrowser sowie als mobile Applikation darstellen. Das Instrument richtet sich an Schüler. Konkret werden durch die Autoren die zwei Spiele *Medieval Wars* und *Dystopian City* benannt, die in ClouDES implementiert sind (Padilla et al. 2016). Das Ziel beider Spielansätze besteht darin, Simulationsmodelle durch Instanziierung vorbereiteter Bausteine gemäß einer Spielbeschreibung aufzubauen. Im Vordergrund steht eine Geschichte, die Spielende zu gewissen Handlungen im Simulationsinstrument motivieren soll. Mit Blick auf das Ziel des jeweiligen Spiels müssen Nutzer die korrekten vordefinierten Bausteine wählen und parametrieren. Neben ClouDES sind den Autoren dieses Beitrags keine weiteren vergleichbaren Ansätze bekannt.

Im Kontext der Heranführung unerfahrener Anwender an ereignisdiskrete Simulationsinstrumente sind in diesem Beitrag die bislang nicht gelösten Herausforderungen adressiert. Es ist im Folgenden ein Spielkonzept entworfen worden, welches sich auf andere Simulationsinstrumente übertragen lassen kann, die zur Modellierung und Simulation komplizierter oder komplexer Systeme geeignet sind. Vor dem Hintergrund der Beschreibung spezifischer Logiken, die sich kaum oder gar nicht mit vordefinierten Objekten modellieren lassen, ist im Folgenden ein Ansatz zur Heranführung an eine Skriptsprache für objektorientierte Simulationsinstrumente dokumentiert. Die Erprobung des Konzepts ist in einem konkreten Szenario beschrieben.

3 Konzept

Nachfolgend ist eine experimentelle mobile Lernumgebung beschrieben. Wissen über die Anwendung ereignisdiskreter Simulationsinstrumente soll orts- und zeitunabhängig vermittelt werden. Der Versuchsaufbau besteht aus einer lernförderlichen mobilen Applikation (App), einer Datenbank und einem Simulationsinstrument. Schematisch ist das Zusammenspiel in Abbildung 1 aufgezeigt.

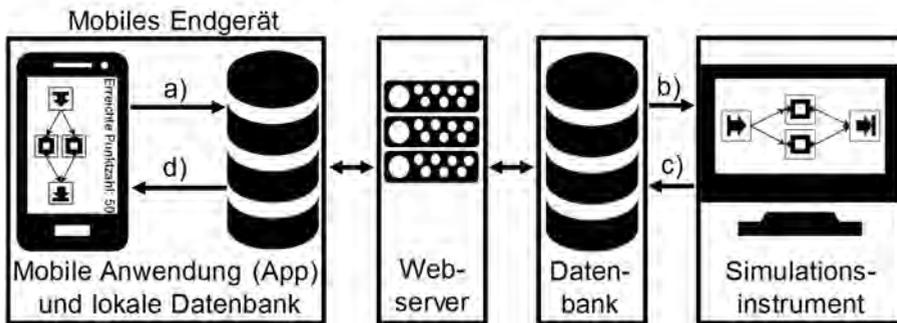


Abbildung 1: Zusammenspiel zwischen App, Datenbank und Simulationsinstrument

Die App, links in Abbildung 1 zu sehen, wird durch den Lernenden bedient. Spielerisch wird von ihm verlangt, Simulationsmodelle aufzubauen. Attribute der Objekte wie Typ, Position in x und y Richtung und Bearbeitungszeit, sowie des Projekts, z. B. Simulationslaufzeit, werden in eine lokale Datenbank übernommen, vgl. a). Die lokale Datenbank wird in einem definierten Zeitintervall unter Nutzung von Skripten, die auf einem Webserver hinterlegt sind, mit einer somit global erreichbaren Datenbank synchronisiert. Diese Architektur ermöglicht die Verwendung unterschiedlicher internetfähiger Endgeräte. Ein Algorithmus in dem Simulationsinstrument generiert basierend auf den in der Datenbank hinterlegten Daten automatisch ein Modell und startet die Simulationsläufe, vgl. b). Zum Ende der Simulation werden die Ergebnisdaten in die Datenbank übertragen, vgl. c). Schließlich kann der Lernende auf diese Daten zugreifen, um sie auszuwerten, vgl. d).

Kern des Aufbaus ist die *gamifizierte App*. Der Lernende baut *inkrementell komplizierter werdende Simulationsmodelle* in einer Modellierumgebung auf. Eine sogenannte *visuell-erziehungsorientierte Skriptsprache* kommt in der App zum Einsatz, um den Nutzern die Syntax einer beispielhaft gewählten Skriptsprache für objektorientierte Simulationsinstrumente zu vermitteln. Es wird ein *implizites Erlernen* eines objektorientierten Simulationsinstruments angestrebt, indem gezielt übereinstimmende Merkmale zwischen der Modellierumgebung in der App und einem exemplarischen Instrument gebildet werden.

Unter *Gamification* wird die Anwendung von Elementen des Spiels in einem nicht-spielerischen Kontext verstanden (Deterding et al. 2011). Elemente sind beispielsweise Belohnungen in Form von öffentlich sichtbaren Punkten, die für besondere Lernerfolge an die Lernenden vergeben werden. Gamification lässt sich hervorragend dazu einsetzen, die Motivation zu steigern, z. B. um Menschen zu einer häufigen Nutzung der Lernumgebung zu motivieren. Durch Punkte, die der Nutzer durch erfolgreiches Absolvieren von Leveln erwirbt, soll seine Aktivität belohnt werden. Diese Punkte sind in einem sogenannten Leaderboard öffentlich sichtbar. Abzeichen werden für offensichtliche und überraschende Erfolge vergeben. Offensichtlich ist z. B. das Erreichen einer bestimmten Punktzahl, überraschend kann z. B. eine Belohnung für die zeitnahe Bearbeitung eines Levels sein.

Die Lernenden werden unter spielerischen Gesichtspunkten dazu motiviert, *inkrementell komplizierter werdende Simulationsmodelle* aufzubauen. Zu Beginn sind einfache Simulationsmodelle zu erstellen, beispielsweise bestehend aus einer Quelle, einer

Senke und einer Bearbeitungsstation. Levelbasiert wird die Schwierigkeit erhöht, indem neue Objekte eingeführt werden, z. B. eine Montagestation, mit der sich ein Teil auf ein anderes laden lässt. Auch das Erlernen einer Skriptsprache ist integraler Teil des spielerischen Lernprozesses. Der Lernende kann spätere Level nur lösen, wenn beschriebene Steuerungsstrategien mithilfe einer Skriptsprache modelliert werden.

Eine *visuell-erziehungsorientierte Skriptsprache für objektorientierte Simulationsinstrumente* entsteht durch die Verschmelzung von objektorientierter Skriptsprache mit einer sogenannten visuell-erziehungsorientierten Programmiersprache. Skriptsprachen unterstützen in Simulationsinstrumenten typische Funktionen wie die Ereignisverwaltung oder Datensammlung (VDI 3633 2014). Das Erlernen einer solchen Sprache ist in vielen Fällen unabdingbar. Dies trifft insbesondere zu, wenn individuelle Steuerungsstrategien in einem Simulationsmodell abgebildet werden sollen. Eine visuell-erziehungsorientierte Programmiersprache ist insbesondere dafür geschaffen, Programmieranfängern den Einstieg in die Programmierung zu ermöglichen. Ein Beispiel ist Scratch, ein Projekt der Lifelong-Kindergarten-Group am Media-Lab des MIT (Scratch 2017). Es handelt sich u. a. um eine Programmiersprache, die insbesondere für 8- bis 16-Jährige konzipiert ist. Es lassen sich visuelle Code-Bausteine durch Ziehen und Ablegen aneinanderfügen, um einfache Spiele oder Animationen zu erstellen. Eine *visuell-erziehungsorientierte Skriptsprache* ist eine prototypische Sprache, die im Hinblick auf die visuellen und erziehungsorientierten Eigenschaften von Scratch inspiriert ist. Das Ziel besteht darin, den zukünftigen Simulationsnutzer an die Programmierung am Beispiel der Syntax einer Skriptsprache für objektorientierte Simulationsinstrumente heranzuführen. Es ist ein Compiler erforderlich, der das vom Lernenden in der App entwickelte Programm in die vom Simulationsinstrument unterstützte Sprache übersetzt.

Implizites Lernen bezeichnet ein unbewusstes Aneignen von Fähigkeiten und Fertigkeiten. Die App weist insbesondere zwei Ähnlichkeiten mit Simulationsinstrumenten auf. Einerseits ist das Erscheinungsbild der Modellierungsumgebung in beiden Umgebungen sehr ähnlich, andererseits die Programmiersprache.

4 Umsetzung und Erprobung

Nachfolgend ist die prototypische Umsetzung der Lernumgebung am Beispiel des Simulationsinstruments Tecnomatix Plant Simulation beschrieben. Anschließend ist die Studie mit Beratern und Studierenden dokumentiert.

4.1 Umsetzung der Lernumgebung

Abbildung 2 zeigt unterschiedliche Screenshots der App. Nach dem Öffnen der App wählt der Lernende, ob er im Experten- oder Levelmodus spielt (vgl. Abb. 2a, sogenannter „Pro Mode“ und „Game Mode“). Im Expertenmodus kann er ein neues Projekt anlegen und wird dann sofort zur Modellieroberfläche (vgl. Abb. 2d) weitergeleitet. Abbildung 2b zeigt die erste Lehreinheit, Levelpack 1, im „Game Mode“. Sie besteht aus zehn Leveln und einem Bonus-Level. Der Nutzer erhält für jedes abgeschlossene Level einen Stern in der Level-Übersicht. Abbildung 2c zeigt beispielhaft die Beschreibung von Level 1-2. In diesem Fall ist das Ziel, dass der Lernende mehrere Bearbeitungsstationen sequenziell miteinander verbindet und weiß,

dass Objekte umbenannt werden können. Abbildung 2d zeigt für diesen Fall die Modellieroberfläche, in der Lernende durch Ziehen und Ablegen die geforderten Objekte instanziiieren. Durch viel Interaktion soll der Lernende belohnt werden. Zum Zweck der Motivation kann er virtuelle Abzeichen erhalten. Diese sind in der sogenannten „Hall of Fame“ für den Lernenden sichtbar. Abbildung 2e zeigt im Hintergrund die vom Lernenden erworbenen Abzeichen und im Vordergrund Details zum angetippten Abzeichen. Im gezeigten Fall hat der Nutzer dieses durch zehnmaliges Öffnen der App erhalten. Abbildung 2f zeigt schließlich das „Leaderboard“. Hierbei handelt es sich um ein global verfügbares Ranking, in dem die Lernenden gemäß ihren Punkten absteigend sortiert gelistet sind.

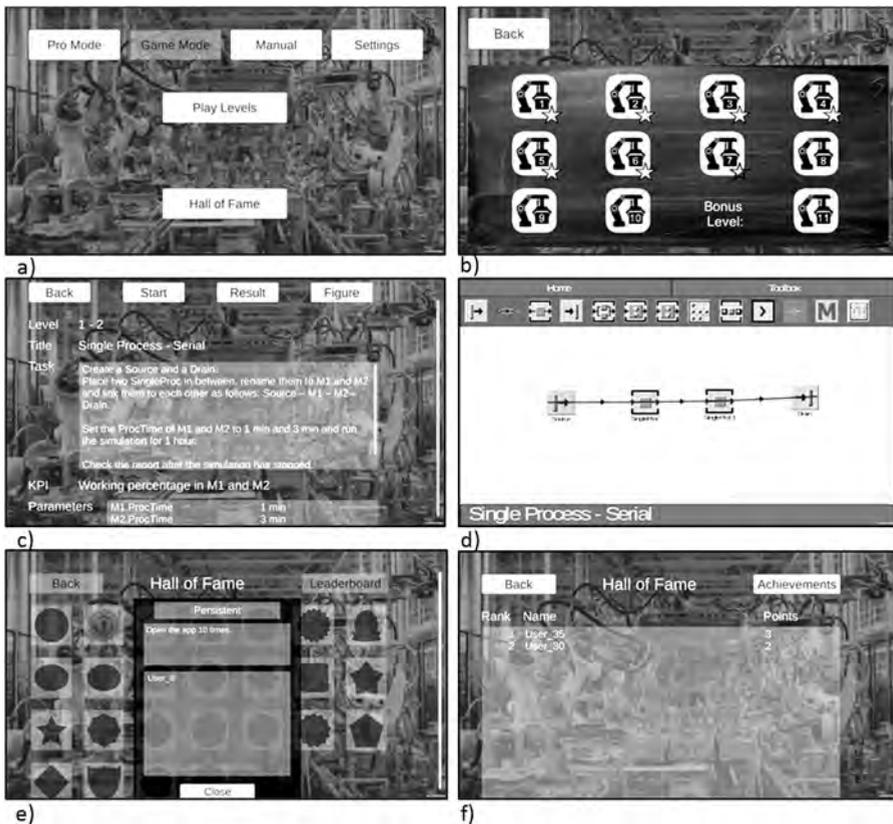


Abbildung 2: Bildschirmfotos der prototypischen App

Die visuell-erziehungsorientierte Skriptsprache ist am Beispiel der Sprache SimTalk des objektorientierten Simulationsinstruments Tecnomatix Plant Simulation umgesetzt. Die wichtigsten Konstrukte wie wenn-dann-Funktionen oder Schleifen sind in der App implementiert. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 3 die neuartige Skriptsprache links und SimTalk rechts gegenübergestellt.

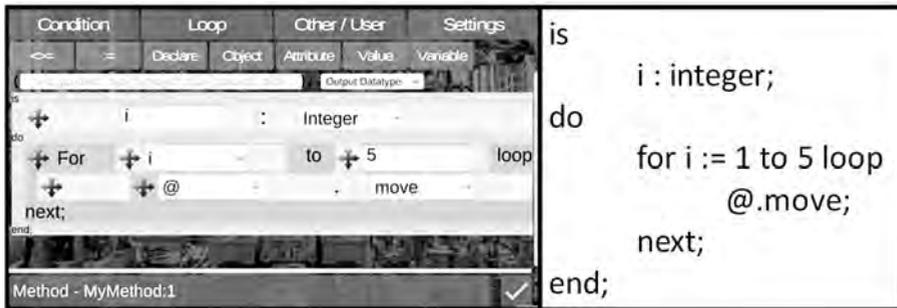


Abbildung 3: Bildschirmfoto der prototypisch implementierten visuell-erziehungsorientierten Skriptsprache für objektorientierte Simulationen links; rechts zum Vergleich „SimTalk“

4.2 Experiment-Design für Erprobung

Die mobile Lernumgebung wurde von Beratern und Studierenden getestet. Die Berater sind Mitarbeiter der UNITY AG aus dem Competence Center Produktion und Digitale Planung. Die Stichprobe umfasst 22 freiwillige Berater. Die teilnehmenden Studierenden sind überwiegend in den Studiengängen Produktionstechnik und Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin eingeschrieben. Begleitend zu einer Lehrveranstaltung über ereignisdiskrete Simulation wurde 31 Studierenden die App zur Nutzung auf ihren Smartphones angeboten. Die Berater und Studierenden konnten zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung kaum oder keine Vorkenntnisse mit Blick auf die ereignisdiskrete Simulation vorweisen. Die Probanden konnten die App ohne konkrete Vorgabe zur Nutzungsintensität testen. Während des 14-tägigen Versuchszeitraums wurde das Nutzungsverhalten der Probanden analysiert. Durch einen Fragebogen wurde das Empfinden der Probanden erfasst. Folgende Hypothesen stehen im Vordergrund:

- Hypothese 1 – Motivationsempfinden: Die Probanden empfinden die App als motivierend, um inkrementell komplizierter werdende Simulationsmodelle aufzubauen.
- Hypothese 2 – Nutzungsverhalten: Die Anwender nutzen die Lernumgebung mehrmals in kurzen Zeitabständen, z. B. während Reisezeiten, Wartezeiten oder kurzen Kreativpausen.
- Hypothese 3 – Wissensvermittlung: Nach der Nutzung der Lernumgebung sind die Probanden in der Lage, für einfache Problemstellungen Simulationsmodelle in Tecnomatix Plant Simulation aufzubauen und zu simulieren.

4.3 Ergebnisse

Von den 53 eingeladenen Probanden reichten 25 (47 %) mindestens ein Modell zur Simulation ein. 20 dieser aktiven Nutzer schafften es ein oder mehrere Level erfolgreich abzuschließen. Die Verteilung dieser 20 aktiven und erfolgreichen Nutzer zwischen den Probandengruppen ist stark unterschiedlich. Von den 22 eingeladenen Probanden der Unternehmensberatung nutzten lediglich sechs die App (27 %), während 19 der 31 eingeladenen Studierenden (61 %) mindestens ein Modell einreichten. Insgesamt wurden während der 14-tägigen Testphase über 400 Modelle in der mobilen Lernumgebung erstellt und an das Simulationsinstrument übergeben.

4.3.1 Hypothese 1: Motivationsempfinden

Abbildung 4 zeigt unterteilt für beide Probandengruppen je Level die Anzahl der eingereichten Modelle. Es ist ersichtlich, dass die Anzahl der eingereichten Modelle mit steigendem Level sinkt. Während der ersten Level ist die Anzahl der eingereichten Modelle relativ konstant, während diese ab Level 1_7 kontinuierlich abnimmt. Die besonders hohe Zahl eingereicherter Modelle zur Lösung von Level 1_10 stellt einen Ausreißer dar. Ein Proband übermittelte knapp 50 Modelle, bis er das richtige Ergebnis erzielte.

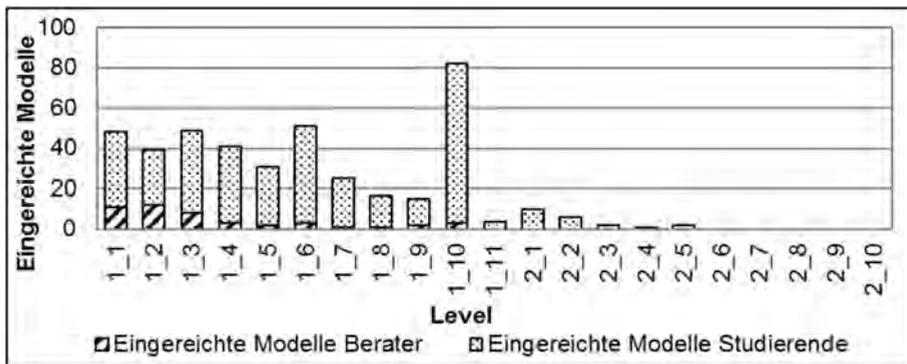


Abbildung 4: Eingereichte Simulationsmodelle je Level

Abbildung 5 zeigt für beide Gruppen die Anzahl erfolgreich abgeschlossener Level. Beispielsweise wurde Level 1_6 im Vergleich zu 1_5 halb so oft erfolgreich abgeschlossen (vier zu acht Probanden). Stellt man dazu die eingereichten Modelle gegenüber (vgl. Abb. 4) wird deutlich, dass Level 1_6 offenbar schwerer zu lösen ist als die vorangegangenen, da bei höherer Anzahl übermittelter Modelle eine geringere Erfolgsquote vorliegt. Dies könnte bei manchem Probanden eine demotivierende Wirkung gehabt haben. Gleichzeitig schlossen erneut acht Probanden die Level 1_7 bis 1_9 erfolgreich ab und benötigten dazu weniger Versuche (vgl. Abb. 4). Dieser Zusammenhang legt die Vermutung nahe, dass bereits ein Lerneffekt eingetreten ist.

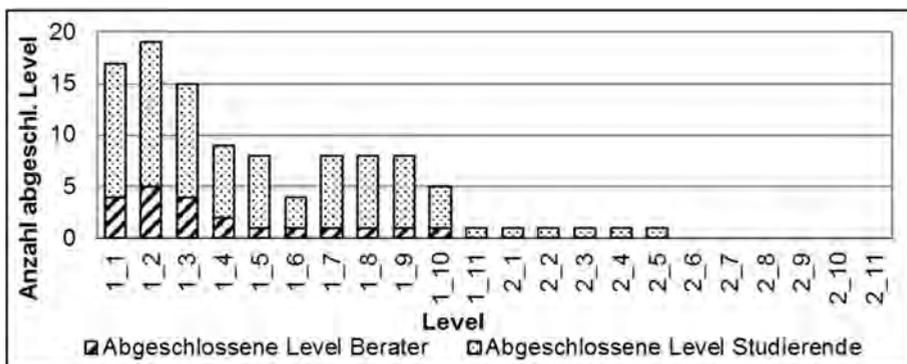


Abbildung 5: Erfolgreich abgeschlossene Level

Die Hypothese lässt sich durch zwei Aussagen stützen. Zum einen wurden über 400 Modelle zur Simulation übermittelt, obwohl den Probanden keine Vorgaben zur Intensität der Nutzung gemacht wurden. Zum anderen wird die Hypothese auch durch die Fragebögen gestützt. Hier geben etwa zwei Drittel der Probanden an, durch die Punktevergabe und der damit einhergehenden Position im Leaderboard (vgl. Abb. 2f), motiviert zu sein. Als demotivierend wurden Software-Fehler der App wahrgenommen, die teilweise den Levelabschluss verhinderten. Ein Großteil dieser Fehler wurde zwar noch während des Erprobungszeitraums behoben, aber dennoch als störend von den Probanden wahrgenommen.

Allgemeingültig lässt sich die motivierende Wirkung der Spielelemente durch das beschriebene Umsetzungsbeispiel nicht belegen. Dass sich jedoch die Lernenden intensiv und freiwillig mit der mobilen Umgebung beschäftigt haben, wird durch die hohe Anzahl eingereicherter Modelle deutlich.

4.3.2 Hypothese 2: Nutzungsverhalten

Abbildung 6 zeigt die Anzahl aktiver Probanden in Abhängigkeit von der Uhrzeit über alle Tage des Nutzungszeitraums hinweg. Es zeigen sich auch hier Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen. Während die Berater relativ konstant zwischen 8 und 24 Uhr aktiv waren, traten bei den Studierenden im gleichen Zeitraum mehrere Häufungen auf: 11-12 Uhr, 14 Uhr und 17 Uhr.

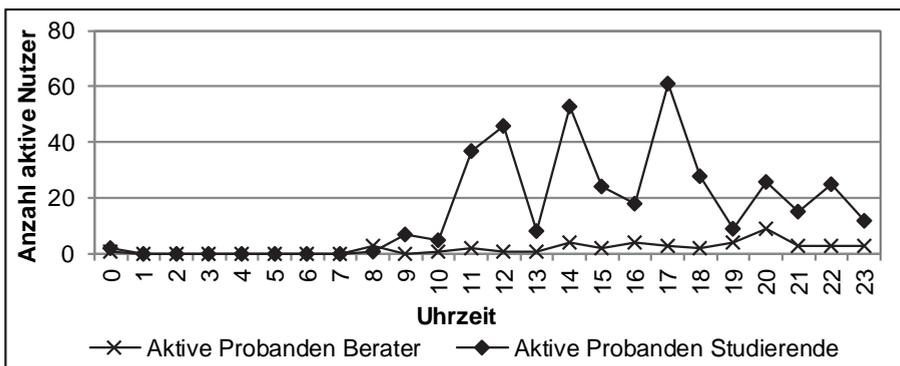


Abbildung 6: Summe aktiver Probanden je Stunde über den Studienzeitraum

Abbildung 7 zeigt die Nutzungsintensität in Abhängigkeit der Uhrzeit über alle Tage des Nutzungszeitraums. Es wird deutlich, dass die Berater in der Regel eine geringe Anzahl an Modellen je Stunde einreichen. Es kann also im Kern von einer mehrmaligen, kurzzeitigen Nutzung der mobilen Lernumgebung ausgegangen werden. Lediglich um 20 Uhr tritt eine Häufung auf, die mit dem vermuteten Ende ihres Arbeitstages zusammenfällt. Bei den Studierenden ist generell eine größere Aktivität festzustellen (Ø20 Modelle je Studierendem im Gegensatz zu Ø10 Modelle je Berater), welche sich auch in der Nutzungsintensität im Tagesverlauf zeigt. Die intensivsten Nutzungszeiträume bei den Studierenden zeigen sich in der Tagesmitte gegen 14 Uhr und spät am Abend um 22 Uhr.

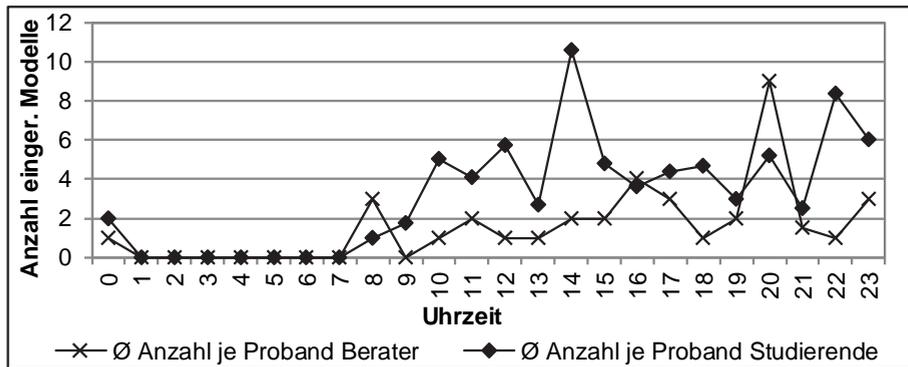


Abbildung 7: Nutzungsintensität pro Stunde

In der Befragung gaben beide Testgruppen an, die App überwiegend zuhause genutzt zu haben. Als zweithäufigste Nennung wurde von beiden Probandengruppen „in öffentlichen Verkehrsmitteln“ angegeben. Die Daten lassen darauf schließen, dass die mobile Lernumgebung mehrmals in kurzen Zeitabständen genutzt wurde. Die Nutzungsaktivität und -intensität sind bei beiden Probandengruppen jedoch sehr unterschiedlich.

4.3.3 Hypothese 3: Wissensvermittlung

Einem Probanden wurden nach Nutzung der Lernumgebung zwei Aufgaben gestellt, die in dem Simulationsinstrument Plant Simulation zu lösen waren. Die erste war identisch mit der Beschreibung eines Levels der Lernumgebung, die zweite erforderte die Verwendung bzw. Implementierung bislang unbekannter Objekte und Steuerungsstrategien. Der Proband konnte ohne weitere Hilfe das Modell der ersten Aufgabe korrekt aufbauen. Zum Simulationsstart war jedoch etwas Hilfe erforderlich, da sich die Symboliken zwischen Simulationsinstrument und App unterscheiden. Die zweite Aufgabe konnte erst nach kurzer Erläuterung der erforderlichen, bislang unbekannt Objekte modelliert und gelöst werden. Dieser Test ist nicht repräsentativ, jedoch deutet sich an, dass Lernende Objekte im Simulationsinstrument wiedererkennen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Erforderliche Vorkenntnisse zur Nutzung handelsüblicher ereignisdiskreter Simulationsinstrumente stellen ein Hindernis in deren breiten Verwendung dar. Vor diesem Hintergrund ist in diesem Beitrag eine prototypische mobile Lernumgebung konzipiert worden. In einer mobilen Applikation sind Elemente des Spielens gestaltet, die den Lernenden zur intensiven Nutzung motivieren sollen. Levelbasiert baut der Lernende inkrementell komplizierter werdende Simulationsmodelle unter Nutzung einer visuell-erziehungsorientierten Skriptsprache auf. Die App ist so gestaltet, dass übereinstimmende Merkmale zwischen der Modellierungsumgebung in der App und einem exemplarischen Simulationsinstrument offensichtlich sind. Die Lernumgebung wurde von Beratern und Studierenden mit Blick auf die wahrgenommene Motivation, das Nutzungsverhalten und den Lernerfolg über zwei Wochen erprobt. Die Probanden erhielten keine konkrete Vorgabe zur Nutzungsintensität.

Von 25 aktiven Spielern wurden über 400 Modelle eingereicht. Diese hohe Anzahl eingereichter Modelle zeigt die große Motivation, die App zu nutzen und viele Punkte zu erreichen. Zwei Drittel der Probanden geben an, durch die verwendeten Spielelemente Motivation zu empfinden. Die Auswertung des Nutzungsverhaltens zeigt, dass die App sowohl über den ganzen Tag verteilt, zuhause und in öffentlichen Verkehrsmitteln genutzt wurde. Die Nutzungsdaten legen nahe, dass die App mehrmals in kurzen Zeitabständen verwendet wurde, wobei sich die Nutzungsaktivität und -intensität je Probandengruppe stark unterscheidet. Ein Proband war nach der Nutzung der App in der Lage, einfache Simulationsmodelle in dem Simulationsinstrument Plant Simulation aufzubauen und mit geringer Hilfe zu simulieren. Die Verwendung bislang unbekannter Objekte im Simulationsinstrument stellte allerdings eine Herausforderung dar.

Auch wenn die Erprobung nicht repräsentativ ist, legen die Ergebnisse nahe, dass die beschriebene Lernumgebung ein geeignetes Mittel ist, um Lernende an die Nutzung ereignisdiskreter Simulationsinstrumente heranzuführen. Weitere Spielelemente können sinnvoll sein, um unterschiedliche Spielertypen anzusprechen. Es ist erforderlich, didaktische Elemente wie Erklär-Videos weiterzuentwickeln. Des Weiteren ist geplant, ansprechende grafische Animationen durch Nutzung einer Game-Engine zu implementieren.

Literatur

- Bangsow, S.: Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer 2015.
- Deterding, S.; Dixon, D.; Khaled, R.; Nacke, L.: From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification". In: Lugmayr, A.; Franssila, H.; Hammouda, I.; Safran, C. (Hrsg.): Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference Envisioning Future Media Environments. Tampere, Finland, 2011, S. 9–15.
- Eley, M.: Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Padilla, J.J.; Diallo, S.Y.; Barraco, A.; Lynch, C.J.; Kavak, H.: Cloud-based simulators. In: Tolks, A.; Diallo, S.; Ryzhov, I.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J. (Hrsg.): Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference: Making simulations accessible to non-experts and experts alike. Savannah, GA, 2014, S. 3630–3639.
- Padilla, J.J.; Lynch, C.J.; Diallo, S.Y.; Gore, R.J.; Barraco, A.; Kavak, H.; Jenkins, B.: Using simulation games for teaching and learning discrete-event simulation. In: Roeder, T.M.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.): Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, Arlington, VA, 2016, S. 3375–3384.
- Scratch: Über Scratch. scratch.mit.edu. Letzter Zugriff am 21.02.2017.
- VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.

Einsatz von simulationsgestützten Lernszenarien für die Ausbildung im Projektmanagement bei Infrastrukturprojekten

Simulation-based Learning Scenarios for Project Management Trainings in Infrastructure Projects

Björn Bockel, Konrad Spang, Fachgebiet Projektmanagement, Universität Kassel,
Kassel (Germany), bockel@uni-kassel.de, spang@uni-kassel.de

Abstract: The challenge for education and training in project management lies in the dynamics of projects, which in workshops can only be taught and practiced with a sufficient number of people. This article provides an approach to transfer the management games for project management trainings at small and medium-sized enterprises (SME) into new simulation-based project management trainings. The dynamics and changes that occur in the daily project management business are randomly generated based on analysed projects. Without the need for many training participants, the advantage is to enable learning alone or in small groups. The article describes the conception of learning scenarios as well as the implementation using the simulation tool Plant Simulation and the project planning software MS-Project. Finally, practice tests of learning scenarios for workshops are presented.

1 Ausgangssituation

Sollen angehende Projektleiter oder Projektteamteilnehmer die Inhalte des Projektmanagements erfahren, wird aktuell auf die Theorieausbildung und verschiedene Planspiele (bspw. Simgame 2017) zurückgegriffen. Meist wird unter den Stichworten „Simulation“ und „Echtzeit“ allerdings weniger Softwareunterstützung, sondern eher Brettspielcharakter (bspw. Proactivity 2017) oder die Verwendung von Whiteboards verstanden (bspw. ML Spectrum 2017). Ausgehend von dem Stand zu Planspielen und Schulungsanwendungen für das Projektmanagement wird besonders nach Softwareanwendungen gesucht, die in Interaktion mit den Projektteamteilnehmern verwendbar sind.

Vereinzelt existieren Anwendungen, die interaktiv einem festen Projektablauf folgen (Simultrain 2017; PM-Simulation 2017) und z. B. auf die Preisvorgaben der teilnehmenden Projektteams reagieren und somit den virtuellen Markt mit Angebot und Nachfrage abbilden (Topsim 2017). Die bestehenden Anwendungen können

allerdings nicht vor Ort an die individuellen Anforderungen eines Ausbildungsworkshops angepasst werden. Stattdessen muss gegebenenfalls ein neues Beispiel beim Hersteller gekauft oder dessen Modellierung in Auftrag gegeben werden.

In der Bearbeitung von komplexen Großprojekten (vgl. Spang 2016) sind selbst mehrtägige Kurse mit klassischen Planspielen nicht flexibel genug, um die Dynamik in der Projektbearbeitung für den Lernerfolg aller Beteiligten einzufangen. Besonders die dynamischen Randbedingungen und der Wechsel von Projektteammitgliedern sind in Schulungen und Planspielen ohne Softwareunterstützung nur aufwendig umzusetzen und bedürfen einer umfangreichen Vorbereitung.

An dieser Stelle soll für die Zielgruppe der KMU sowie für Forschungseinrichtungen die Projektmanagementausbildung mit Planspielen über die Simulation abgebildet werden, um die Dynamiken und den Wechsel der Datenbasis für verschiedene Szenarien integrieren zu können. Bisher ist eine Art kritische Masse von Workshopteilnehmern in Seminaren anzustreben, um bezüglich der dynamischen Faktoren einen entsprechenden Lernerfolg hervorzurufen. Mit dem Einsatz der Simulation dagegen besteht der Vorteil, dass auch alleine oder in kleinen Gruppen gelernt und Erfahrungen gesammelt werden können. Gleichzeitig können die Ergebnisse der Planung von den Projektteams bzw. den einzelnen Teilnehmern in die Simulation des nächsten Projektabschnitts eingespielt werden. Des Weiteren wird durch die direkte Kopplung der Schulungsinhalte an ein Simulationswerkzeug eine flexible Umsetzung erreicht, bei der schneller als bisher neue Beispiele eingelesen, angepasst und für den Ausbildungsbetrieb eingerichtet werden können.

Da MS-Project neben OpenProject (OpenProject 2017) oder TILOS (für Infrastrukturprojekte) eines der gängigsten Projektmanagementwerkzeuge beim Einsatz für kleine und mittlere Projekte ist, wird entsprechend der vom Fachgebiet Projektmanagement (Universität Kassel) ermittelten Kundenanforderungen die Lösung an die Standards von MS-Project angelehnt (vgl. Wenzel und Laroque 2015).

2 Inhalte der Erfahrungsdatenbank

Bei der Planung von Projekten kommt es trotz aller Sorgfalt immer wieder zu nicht eingeplanten Herausforderungen mit extra Aufwänden, die über Nachträge aufwendig eingesteuert werden müssen. Aus diesem Grund sollen die Erfahrungen vergangener Projekte für die Planung von zukünftigen Projekten in Form von Risikokennwerten ermittelt und abgelegt werden. Unter Risikokennwerten wird in diesem Zusammenhang verstanden, welche Ursachen innerhalb einzelner Projektvorgänge zu Nachträgen gegenüber dem Angebot und somit zu Kosten- oder Zeiterhöhungen geführt haben. Durch die Kennwerte kann ein Risikofaktor gewonnen werden, der auf die zugehörigen Vorgänge bei der Planung von weiteren Projekten angewendet wird. Diese Ursachen mit den häufigsten Veränderungen für Kosten oder Zeit sind eine Grundlage, um auf branchennahe Projekthinhalte zu schließen. So kann beispielsweise von der Erkundungsphase für Eisenbahntrassen auf die Erkundungsphase bei der Durchführung anderer Infrastrukturprojekte geschlossen werden, sollten noch keine Daten in der Datenbank vorliegen.

Am Fachgebiet Projektmanagement der Universität Kassel wurde in der Vergangenheit für Drittmittelgeber eine Analyse von abgeschlossenen Infrastrukturprojekten zur Aufstellung von Risikokennwertkatalogen durchgeführt. Dabei wurden die Ursachen

für Verzögerungen im zeitlichen Ablauf oder/ und zur Erhöhung der Kostenstruktur für über 100 Infrastrukturprojekte ausgewertet. Diese Ergebnisse über die ermittelten Risikokennwerte fließen in aggregierter Form in eine Erfahrungsdatenbank ein, die während der Simulation für die realitätsnahe Gestaltung des Beispielprojektverlaufs herangezogen wird.

Die Modifikationen aus der Erfahrungsdatenbank werden dem Projekt durch den Workshopleiter schrittweise zugeordnet. Auf der Basis eines Templates für den Projektablauf aus MS-Project werden später durch die Workshopteilnehmer die geplanten Zeiten und Kosten hinterlegt. Grundsätzlich gibt es für die Zuordnung der Erfahrungen und Risikokennwerte auf der Simulationsseite drei Möglichkeiten (Abb. 1): Wenn für die Branche, in der das Simulationsprojekt durchgeführt wird, keine Datenbasis vorliegt, könnte auf sehr allgemeine branchenübergreifenden Risikokennwerte zurückgegriffen werden. Liegen, wie im gewählten Beispiel, Daten aus der Branche vor, können für den jeweiligen Vorgang die Verzögerungen und Kostenerhöhungen gezielt über die Ursachen zugeordnet werden. Zusätzlich kann der Workshopleiter für den Kurs manuell eine zusätzliche Modifikation einzelner Vorgänge einspielen. Diese kann bestehende Kennwerte ersetzen (absolute Modifikation) oder verändern (relative Modifikation).

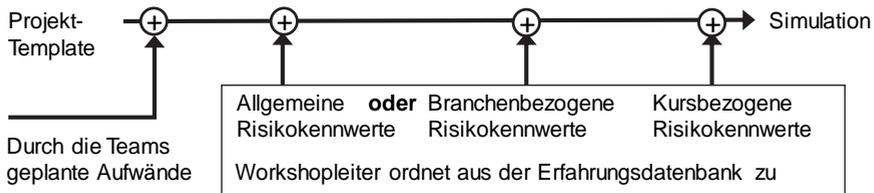


Abbildung 1: Zuordnung von Risikokennwerten in das Projekttemplate

Insgesamt gibt es so neben dem geplanten Zustand über die branchenspezifischen Kennwerte eine Modifikation von Laufzeit und Kosten, die zusätzlich für spezielle Herausforderungen des Kursinhaltes ergänzt werden kann.

3 Beispiel: Verlegen einer Pipeline

Für das erste Simulationsbeispiel wird das Verlegen einer Pipeline über Land realisiert, weil dieses für die verschiedenen Zielgruppen der Projektmanagementworkshops eine ausreichende Komplexität gewährleistet, aber trotzdem mit seinen fachlichen Inhalten ohne Vorkenntnisse einfacher zu verstehen ist, wie die meisten anderen Beispiele aus dem Bereich Infrastrukturprojekte. So ist die Planung einer Autobahn oder einer ICE-Trasse deutlich komplexer. Für das Verlegen der Pipeline existieren trotz des überschaubaren Prozesses verschiedene Wahlmöglichkeiten, um mögliche Optionen bei der Planung durch die Teams berücksichtigen zu können. Im ersten Schritt werden Querungen von Flüssen, Straßen oder Eisenbahntrassen nicht abgebildet. Eine weitere Ergänzung mit begleitender Erweiterung der Simulationsbausteine und Projektplan-Templates ist in der Planung. Die Arbeit an Steigungen und Gefällstrecken, an denen das Verlegen der Pipeline mit zusätzlichen Arbeitsschritten zu erfolgen hat, wird vereinfacht abgebildet. Das bedeutet, die Schritte der Pipeline

(Abb. 2) werden von der Vermessung, dem Verlegen und Schweißen der Pipeline-segmente bis zu den abschließenden Tests und der Renaturierung durchgeführt.



Abbildung 2: Auszug aus den Schritten der Pipelineverlegung (vgl. INGAA 2017)

Entlang der Bauabschnitte der Pipeline werden Höhenprofile hinterlegt, damit die Linienelemente im Simulationsmodell eine Steigung oder ein Gefälle aufweisen und bei einer späteren 3D-Visualisierung einen übersichtlichen Blick auf die Streckenführung erlauben. Des Weiteren findet die Markierung von Wald- und Freiflächen entlang der Pipeline entweder durch die Teams statt (in einem komplexeren zweitägigen Workshop) oder in der vereinfachten Anwendung sind diese Optionen durch den Workshopleiter voreingestellt. In einem solchen Fall wird eine feste Strecke im Projektbeispiel durchlaufen. Dabei kann, um die Teams herauszufordern und Variationen hervorzurufen, entweder jedes Team genau die gleiche Strecke und die gleichen Bedingungen (bspw. Produktionsfehler in der Pipeline, Rhythmus der Pipelineanlieferung, Wetter, Proteste gegen das Pipelineprojekt oder Schwankungen in der Bodenbeschaffenheit) durchlaufen. Zum zweiten können verschiedene Strecken aber gleiche Bedingungen oder die gleiche Strecke bei verschiedenen Bedingungen geplant werden. Die Bedingungen werden entweder durch den Workshopleiter gesetzt oder durch Zufallszahlenströme bestimmt. Der Verteilungsmechanismus für die Bedingungen gewährleistet, dass verschiedene Streckenprofile trotzdem die gleichen prozentualen Anteile für z. B. Wald, Felsen oder starke Steigungen enthalten. Auf diesem Wege bleiben verschiedene Teams in ihrer Planung vergleichbar.

Damit der Workshopleiter zufälligen Störungen und Randbedingungen für die Projektteams besser setzen kann, werden Störungen komplett im Vorfeld eingerichtet bzw. erzeugt. Der Workshopleiter kann entweder das Modell (siehe Abschnitt 4) die aufgestellte Störungsliste abarbeiten lassen, oder die Liste entsprechend seiner Workshopziele und Fallbeispiele modifizieren. Dabei wird zwischen dem Setzen von Störbereichen im Kalender und dem konkreten Eintragen von festen Störzeitpunkten zu einem genauen Termin unterschieden.

4 Modellaufbau

Für jeden Vorgang tragen die Teams in MS-Project ihre geplanten Anfangstermine sowie die Dauer ein. Diese werden beim Export aus MS-Project in das Simulationsmodell übertragen, d. h., sie dienen mit Anfangs- und Endterminen sowie den benannten Kosten als Soll-Vorgabe laut Angebot. Nach dem Einlesen dieser Projektpläne wird aus den einzelnen Vorgangsdaten der Projektpläne mittels automatischer Modellgenerierung ein Modell erzeugt, die Ressourcen zugeordnet und die Eingangsdaten zusammen mit den verschiedenen Fällen aus der Erfahrungsdatenbank eingeschrieben. Die Datenbasis dieser Erfahrungsdatenbank stützt sich auf die Analyse bereits durchgeführter Projekte, wobei die aufgetretenen Risikofaktoren zu einer prozentualen Wahrscheinlichkeit für den Eintritt einzelner Fälle umgerechnet wurden. Das fertige Simulationsmodell kann ab diesem Punkt vollständig zufallsbasiert betrieben werden, teilweise statische und teils dynamische Parameter aufweisen oder alternativ durch den Anwender gezielte Fallvorgaben erhalten. Des Weiteren stellt das Tool einen Szenariomanager zur Verfügung, in dem die gewünschten Schulungsfälle für einen Projektverlauf hinterlegt und anschließend durch den Workshopleiter für die Übungsbeispiele aktiviert werden.

Theoretisch ist denkbar mit mehreren Teams ein Simulationsmodell mit Eingangsdaten zu steuern. Im Moment laufen für die Teams getrennte Simulationsmodellinstanzen auf teilweise gleicher Eingangsdatenbasis. Die Unterschiede liegen in der Route der Pipeline und in den getroffenen Entscheidungen der einzelnen Teams.

Für den Aufbau des Simulationsmodells werden für das oben beschriebene Beispiel „Legen einer Pipeline“ die Bausteine im Simulationswerkzeug Plant Simulation erstellt. Im Wesentlichen gibt es zwei Bausteine für die Simulation der Pipeline: die Knotenpunkte, in denen sich in den Bauabschnitten die Gewerke abwechseln, und die Linienelemente zwischen diesen Punkten, an denen die Pipeline nach gleichem Projektplan und gleichen Randbedingungen gelegt werden wird. Das bedeutet, dass der Anwender die Punkte der verschiedenen Gewerke und Bauabschnitte auf der Landkarte positioniert, Projektpläne zuordnet und dass dazwischen automatisch das Linienelement „Pipeline“ positioniert wird (Abb. 3).

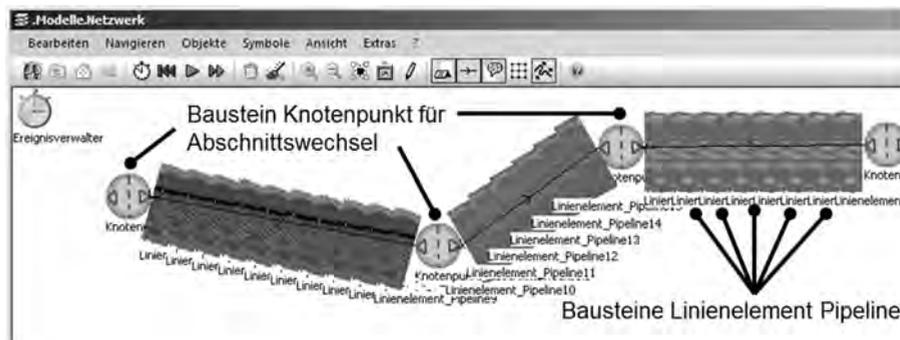


Abbildung 3: Simulationsmodell mit Knotenpunkten und Linienelement

Der Simulationsbaustein für ein Linienelement soll zwischen den Punkten für die einzelnen Bauabschnitte einen Teil des Pipeline Arbeitsstreifens abdecken. Das

Linienelement dimensioniert sich anhand der Angabe der im Arbeitsstreifen abzubildenden Pipelinelänge selbst und generiert die zugehörigen Fahrwege der Fahrzeuge. Somit wird über die automatische Skalierung gewährleistet, dass eine maßstäbliche Abbildung in Plant Simulation erfolgt, aber der Anwender keine einzelnen Straßen in das Simulationsmodell zeichnen muss.

Der Simulationsbaustein für einen Knotenpunkt, an dem die Wechsel zwischen Bauabschnitten oder Gewerken stattfinden, wird mit einem oder mehreren Vorgängern bzw. einem oder mehreren Nachfolgern sowie zur Auftragsliste des gesamten Projektes verlinkt. Im Knotenpunkt werden Plätze für die verschiedenen Fahrzeuge vorgehalten, die sich nach Abschluss eines Bauabschnitts in den nächsten Bauabschnitt bewegen, aber vor dem Start noch auf die Bearbeitung vorgelagerter Vorgänge warten müssen. Dies stellt natürlich eine Vereinfachung dar, da die Fahrzeuge sich eigentlich im letzten Linienelement aufhalten würden. Bereitstellflächen und Rohrlagerplätze werden ebenfalls im Knotenpunkt abgebildet.

Die Zuordnung der Ressourcen zu jedem einzelnen Vorgang kann über den Typ erfolgen oder über genau eine Ressource, also z. B. ein ganz bestimmtes Fahrzeug dieses Typs aus der Ressourcendatenbank. Da der Gesamtprojektplan soweit in Abschnitte heruntergebrochen wird, dass auf Bauabschnitts- und Gewerkeebene ein Plan zugeordnet werden kann, bedeutet dies für das Simulationsmodell, dass die Pipeline auf die jeweiligen Meter bezogen unterteilt werden muss. So unterscheiden sich beispielsweise die Projektpläne für freie Fläche oder Waldstreifen, auf denen eine langsamere und kostenintensivere Umsetzung aufgrund eines kleineren Arbeitsbereichs erfolgt. Ist beim Ziehen des Rohrgrabens für die Pipeline noch zusätzlich Gestein zu brechen, muss der zugehörige Projektplan durch die Teams um diese Tätigkeiten und Ressourcen ergänzt werden. Die langsamere Ausführung an steilen Hängen mit Einzelrohrverlegung und entsprechende Schweiß Tätigkeiten werden im aktuellen Modell nicht dargestellt, sondern über die erhöhten Zeiten mittels Projektplan abgebildet. Optional ist es möglich, die Planteile anhand von Ressourcenzuordnung bzw. Eigenschaften des Geländes zu aktivieren. Die Teams lernen allerdings mehr bei der manuellen Zuordnung der Ressourcen und der Aufteilung der Fahrzeuge auf die Bauabschnitte, während das Simulationsmodell versucht, mit den zugeteilten Ressourcen die anstehenden Aufgaben laut den jeweiligen Projektplänen schnellstmöglich abzuarbeiten. Das Modell liefert bei Überschreiten des Fertigstellungstermins den Teams einen Ansatzpunkt zur Überarbeitung ihrer Planung.

Das Simulationsmodell ist mit der beschriebenen Bausteinkonzeption hochflexibel, um für verschiedene Teams einen anderen Pipelineverlauf simulieren zu können. Die Abbildung der Fahrzeuge innerhalb des Linienbausteins wird für die Bagger und anderen Fahrzeuge ähnlich eines Zustandsautomaten umgesetzt (vgl. Borrmann et al. 2015 S. 200), wobei die Fahrzeuge von den Bereitstellflächen zum geplanten Einsatzort fahren, dort arbeiten oder auf den nächsten Prozessschritt warten. Optional kann bei dem Modell über die zugeordneten Ressourcen ein Arbeitszeitmodell für die Mitarbeiter bzw. für Störfälle in den Fahrzeugen hinterlegt werden.

Die Fahrzeuge melden die Ankunft am Zielort, wenn sie beispielsweise am Rohrlagerplatz oder an der richtigen Position entlang der Pipeline eingetroffen sind. Beim Abschluss eines Fahr- oder Arbeitsauftrages werden die Ergebnisse an eine zentrale Auftragsliste gesendet, die mit den Prioritäten der Teams hinterlegt ist. Die Fahrzeuge suchen automatisch die nächsten Aufträge anhand der Liste.

Die Fahrzeuge buchen sich mit angefallenen Kosten in den zugehörigen Projektvorgang ein, wobei bisher die Zustände „Arbeitend“ und „Wartend“ unterschieden werden, später sollen noch „Gestört“ und „Pause“ getrennt ermittelt werden. Die Wartezeiten an Knotenpunkten oder Bereitstellflächen werden dabei auf ein allgemeines Konto gebucht, während ansonsten die genaue Zuordnung von Projektvorgang und aktuellen Meter der Pipeline erfolgen kann. Jedes Linienelement meldet seinerseits die Ergebnisse und Fortschritte in eine Gesamtliste der Auswertungsbausteine und an den zum Projektvorgang verknüpften Simulationsbaustein „Vorgang“. Das Auswertungs- und Controllingmodul steht nur für die Workshopleitung zur Verfügung oder darf von den Teams erst in der Nachbesprechung verwendet werden. Angezeigt werden der eingangs eingestellte Planungs- und Sollstand entsprechend des Angebots sowie der tatsächlich simulierte Verlauf der Teams im Vergleich.

Der Controllingmodus läuft in den drei Dimensionen Zeit, Kosten und Qualität. Die Zeit wird auf der X-Achse aufgetragen und die Kosten auf der Y-Achse; die Qualität wird über die Z-Achse oder eine Farbcodierung realisiert. Standard ist die Darstellung von Zeit und Kosten, weil die Qualität der Pipelineverlegung mit der Maßgabe des vollständigen und geprüften Zustandes als konstant vorausgesetzt wird. Die Darstellung des Projektplans existiert in zwei Modi. Zum einen wird der Plan mit den tatsächlichen Anfangs- und Endterminen von Soll- und Ist-Vorgängen dargestellt, damit die Teams den zeitlichen Verzug betrachten können. Im zweiten Modus werden Soll- und Ist-Vorgang auf dem idealisierten Starttermin sozusagen „startterminneutral“ angezeigt, damit die Dimensionen von Zeiten und Kosten der Vorgänge im Soll/Ist-Vergleich besser deutlich werden.

5 Ablauf zur Workshoperstellung und -durchführung

Ausgehend von der Aufgabenstellung wird für die Workshops ein zweistufiges Konzept vorgesehen. Dabei sind Arbeiten im Vorfeld zur Einrichtung des Simulationsmodells durch den Workshopleiter durchzuführen, und teilweise bestehen Aufgaben für die Teams während des eigentlichen Workshops. Zuerst müssen die Bausteine für das Beispiel der entsprechenden Branche vorliegen oder erstellt werden. Im Anschluss werden Musterprojektpläne erzeugt, die die korrekten Arbeitsreihenfolgen, aber noch nicht die tatsächlichen Kosten und Dauern enthalten. Das Ganze ist als eine Art Projekttemplate für die Teams zu verstehen, wenn sie die Simulation starten möchten. Die Aufgabenstellung enthält ausführlich die oben bereits vorgestellte Prozessabfolge zum jeweiligen Projekt. Zu Beginn der ein- bis zweitägigen Workshops werden die Teams gebildet und lesen sich in die Aufgabenstellung ein. Auf der Basis werden dann der Projektstrukturplan und die Abfolge in Form eines Gantt-Diagramms abgeleitet und der erforderliche Ressourceneinsatz kalkuliert. Zum Ende der Planungsphase im Workshop geben die Teams ein Angebot ab, in dem sie ihre kalkulierten Kosten und erforderliche Zeit zur Lösung der Aufgabenstellung benennen.

Der in MS-Project aufgestellte Plan kann zum Abschluss des ersten Workshopteils bereits in die Simulation eingespielt werden. Sind an dieser Stelle noch kleinere Fehler in den Listen für die Ressourcen und deren Zuordnung zu den Vorgängen, bleibt die Simulation wahrscheinlich stehen oder läuft nur sehr langsam ab. Mit diesem Feedback wird zum Ende des ersten Workshopteils eine Überarbeitung der Planung und der Angebote vorgenommen und diese anschließend fixiert.

Im zweiten Workshopteil werden die von der Workshopleitung erarbeiteten Musterpläne/-templates für die Teams bereitgestellt und dafür für jedes Simulationsintervall (hier eine Woche) die Ressourcenzuordnungen durch die Teams festgelegt. Des Weiteren haben die Teams die Zuordnung der Reihenfolge einzelner Bauabschnitte und Gewerke durchzuführen. Dies bedeutet, die einzelnen Projektpläne zwischen den beiden Punkten eines kleinen Pipelineabschnitts zu definieren. Die Simulation läuft nach Einstellung der Eingangsdaten in dem festen Intervall und die Teams sind für die Fortschrittskontrolle und das zugehörige Controlling selbst verantwortlich. Das Simulationsmodell läuft ohne Animation sehr schnell durch, damit die Teams nicht schon beim Betrachten des Modells die Fehler sehen können, die sie eigentlich durch die sorgfältige Analyse und das Projektcontrolling ermitteln sollen. Zum Ende jedes Intervalls werden die Teams die Möglichkeit haben, Änderungen in der Zuordnung, dem Ort des Ressourceneinsatzes oder der Ressourcenanzahl vorzunehmen. Gleichzeitig speichert die Simulation alle Ergebnisse des jeweiligen Teams bis zum aktuellen Zeitpunkt, diese sind somit für den Workshopleiter einsehbar und vergleichbar.

Bei dem Simulationslauf existieren zwei verschiedene Arten von Haltepunkten. Die einen sind in Abhängigkeit des vorgegebenen Intervalls und erwarten von den Teams die Eingabe der Vorgaben für das nächste Intervall. Die Simulation kann hier wieder gestartet werden. Feste Haltepunkte dagegen bilden für alle Teams eine Vorgabe, bei der sie auf die anderen Teams warten müssen, weil dann Vorgänge von außen auf die Teams einwirken (z. B. der Tausch von Teammitgliedern und die Neuordnung von Verantwortlichkeiten). Dieser Wechsel von den Teammitgliedern wird im Vorgehen ohne Simulationsunterstützung durch den Workshopleiter gezielt eingesteuert. Mit der Simulation kann ein Wechsel zu einem festen Zeitpunkt innerhalb des virtuellen Projektablaufs erfolgen, sodass die gleichen Bedingungen für alle Projektteams gesichert werden. Wenn die Teams das Projekt komplett bearbeitet haben, werden ihnen im Nachgang die Ergebnisse der anderen Teams angezeigt. Im Rahmen des Workshops werden unterschiedliche Herangehensweisen der Teams besprochen und ggf. die Simulation mit geänderten Parametern neu gestartet.

6 Aufbau verschiedener Lernszenarien

Die Funktion und der Aufbau der Szenarien für Schulungszwecke richten sich nach den Kenntnissen der Workshopteilnehmer, die als Vorkenntnisse lediglich Basis MS-Project-Erfahrung mitbringen. Die Lernszenarien, die sich von einfacheren bis komplexeren Aufgabenstellungen erstrecken, können zusätzlich noch durch das Aktivieren weiterer Optionen ergänzt werden (Tab. 1). Das Aufsetzen eines neuen Lernszenarios aus bestehenden Auswahloptionen kann durch den Workshopleiter innerhalb von 15 Minuten umgesetzt werden. Zuerst läuft das Modell ohne Querungen und in einem steigungs- und gefällefremden Modus auf flacher Ebene, um erste Tests mit den Teams durchzuführen. Dann wird die Option für Waldflächen eingeschaltet, bevor Gestein beim Graben behindert. Anschließend wird die Option für besondere Arbeiten an steilen Hängen aktiviert, für die die Teams vier weitere Projektplanvarianten zu erstellen haben.

Tabelle 1: Lernszenarien

Lernszenario		Projektplananzahl		
1	Flach	ohne Wald	weicher Boden	1
2	Flach	mit Wald	weicher Boden	2
3	Flach	mit Wald	mit Gestein	4
4	Steigungen	mit Wald	mit Gestein	8
Option 1	Wetter			
Option 2	schwankende Bodenbeschaffenheit			
Option 3	Schwankende Pipeline-Produktion	Schwankende Anlieferung		
Option 4	Austausch von Teammitgliedern			

Das Wetter und die Bodenbeschaffenheit variieren als dynamische Faktoren über die gesamte Projektlaufzeit, wenn sie aktiviert werden. So wird das zufällige Wetter in Anlehnung an hinterlegte Profile mit langanhaltenden Regenphasen die Arbeiten stärker verzögern und die Teams zu verschiedenen Zeitpunkten im Projekt vor neue Herausforderungen stellen. In der nächsten Option können beispielsweise Produktionsfehler in der Pipeline sowie der Rhythmus der Pipelineanlieferung für weitere Spannung sorgen. Der Austausch von Teammitgliedern zu einem festen Zeitpunkt im virtuellen Projekt wird gegebenenfalls ausgewürfelt, um nach dem Tausch die Kommunikation und das Teamgefüge zu testen.

Die Vorteile mehrerer Lernszenarien in Verbindung mit dem Einsatz der Simulation liegen unter anderem in der Wiederholbarkeit des Seminars, weil bei Variation der Parameter kein „Workshopjahrgang“ wie der nächste sein wird. Zusätzlich besteht die Option mit den gleichen Teams mehrere Iterationen während eines Workshops zu durchlaufen, wobei die Aufgabenstellung durch immer mehr Randbedingungen und Zufallsereignisse Schritt für Schritt schwieriger wird. Als Nebeneffekt der gezeigten Vorgehensweise muss der Workshopleiter weniger das Beispiel an sich meistern, sondern kann sich mehr auf die eigentliche Aufgabe der Moderation und Hilfestellung konzentrieren.

7 Fazit und Ausblick

Tests der vorgestellten Workshopabfolge mit den Lernszenarien sowie dem vorgestellten Simulationsmodell zeigen, dass es bei den Möglichkeiten des Simulationsmodells schwierig ist, den Workshopteilnehmern nicht zu viel abzunehmen. So bietet die Simulation Controllingfunktionen mit oder ohne programmierten Funktionen. Alle Funktionen mit programmierten Inhalten lassen sich durch Passworte mittels einer Benutzeranmeldung ausschalten. Wer sich allerdings mit dem Simulationswerkzeug auskennt, kann Diagramme zu Auswertungszwecken selbst einfügen. Die Lösung wäre, keine Modellvariationen außer der Streckenführung zuzulassen oder auf Runtime-Lizenzen zurückzugreifen.

In Zukunft sollen weiterhin mehr Optionen integriert werden, die mehr Variationen im Projektablauf hervorrufen, um den Herausforderungen des täglichen Projekttrainings entsprechen zu können. Außerdem liegen weitere Themen in der Umsetzung für Simulationsbausteine, wie beispielsweise zu Infrastrukturprojekten für den Bau von Eisenbahntrassen, zur Verlegung von Erdkabeln für die Energieversorgung oder für den Straßenbau. So soll die Simulationsumgebung und die Schulungen Schritt für Schritt um weitere Branchen und Anwendungsfälle erweitert werden. Der Transfer auf andere Bereiche (Sondermaschinenbau oder Planung einer Produktionslinie) ist denkbar, allerdings müssen die passenden Simulationsbausteine für die dynamische Abbildung erstellt werden.

Der Einsatz der simulationsgestützten Lernszenarien und deren Vergleich zwischen verschiedenen Teams zeigt das Potenzial, das in der Generierung von Variationen in der Aus- und Weiterbildung liegt. Gleichzeitig kommen die Teammitglieder (teilweise zum ersten Mal) mit einem Simulationswerkzeug in Kontakt und lernen dessen Einfluss auf die Absicherung von Projektplanungen kennen.

Literatur

- Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.
- Interstate Natural Gas Association of America INGAA; Fractracker: Pipeline Construction: Step by Step Guide. <https://www.fractracker.org/resources/oil-and-gas-101/pipeline-construction/>. Letzter Zugriff am 12.02.2017.
- ML Spectrum: Live Seminar mit einer Projektmanagement Simulation. <http://www.ml-spectrum.de/training-seminare-schulung-workshops/projektmanagement/projektmanagement-simulation/>. Letzter Zugriff am 14.02.2017.
- OpenProject: Collaborative Project Management Software. www.openproject.org. Letzter Zugriff am 14.02.2017.
- PM-Simulation: Interaktive Projektmanagementsimulation. <http://www.pmsimulation.de/>. Letzter Zugriff am 14.02.2017.
- projectivity: Planspiel projectivity. <http://www.projectivity.de/>. Letzter Zugriff am 14.02.2017.
- Simgame: Projektmanagement Simulation. www.simgame.de/projektmanagement-simulation-grundlagen.html. Letzter Zugriff am 14.02.2017.
- Simultrain: Projektmanagementsimulator für Projektmanagementtrainings. www.simultrain.com. Letzter Zugriff am 14.02.2017.
- Spang, K. (Hrsg.): Projektmanagement von Verkehrsinfrastrukturprojekten. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016.
- Topsim: Planspiel Lösungen. www.topsim.com/de/standard-planspiele.html. Letzter Zugriff am 14.02.2017.
- Wenzel, S.; Laroque, C. (Hrsg.): Schlussbericht zum Projekt simject - Simulationsgestütztes logistikintegriertes Projektmanagement im Anlagenbau. Kassel: Universitätsbibliothek Kassel, 2015.

Integrierte, zweistufige Methodik zur Kostenoptimierung volatiler Distributionssysteme am Beispiel der Bauzulieferindustrie

Integrated Two-stage Methodology for the Cost Optimization of Volatile Distribution Systems in the Building Supplies Industry

Kai Philipp Bauer, Denise Pohlig, Andreas Linder, Veronika Haase,
ifp Prof. Dr.-Ing. Joachim Milberg, Institut für Produktion und Logistik GmbH &
Co. KG, Garching b. München (Germany), kai-philipp.bauer@ifpconsulting.de,
denise.pohlig@ifpconsulting.de, andreas.linder@ifpconsulting.de,
veronika.haase@ifpanalytics.de

Abstract: Using an exemplary application in the building supplies industry, the article describes a two-stage methodology, which has been developed to simulate and optimize volatile distribution systems including connecting transports between the supplying production sites. In the first stage, the distribution task is abstracted by an enhanced tabu search algorithm. In the second step, this abstracted distribution task is incorporated into a simulation model using the software IBM ILOG LogicNet Plus. In a subsequent series of simulation studies, a cost optimized setup of the distribution is being determined. The methodology generates good results with less than 0,1 % gap to the as-is total costs and more than 10 % in total cost savings by the optimized network setup.

1 Einleitung und Motivation

Der steigende Wettbewerbsdruck zwingt Unternehmen, mehr Kundenservice anzubieten und gleichzeitig die Kosten zu senken. Die optimale Gestaltung eines Distributionssystems ist hierbei erfolgsentscheidend. Unternehmen können dabei mit zahlreichen Herausforderungen konfrontiert sein:

- Produkte mit geringer Wertdichte weisen einen hohen Transportkostenanteil auf.
- Viele Belieferungspunkte reduzieren die Größe der Belieferungsgebiete und erhöhen zusammen mit dem hohen Service Level den Transportmitteleinsatz.
- Kundenspezifische Produkte und ein volatiles Bestellverhalten verringern die effektive Auslastung der eingesetzten Transportfahrzeuge und erschweren die Tourenplanung.
- Integrierte Werksverkehre erfordern aufeinander abgestimmte Fahrpläne und erschweren so die Lösungsfindung.

Diese Herausforderungen treffen auch in der Bauzulieferindustrie zu. Die Bauzulieferindustrie versorgt die ausführenden Baufirmen mit Roh-, Halbfertig- und Fertigprodukten, z. B. Fenster und Betonprodukte. Die Distributionskosten in dieser Branche betragen oftmals 10 %-20 % gemessen am Umsatz. Da der Verkauf über Fachhändler, die Lieferung aber oftmals auf die Baustelle erfolgt, ergibt sich eine ebenso komplexe wie kostenaufwendige Distributionsaufgabe.

Das Tagesgeschäft in der Bauzulieferindustrie folgt oftmals dem Takt der Baustelle und unterliegt deshalb einer starken Volatilität, sodass operative und taktische Distributionsplanung im Widerspruch zum klassischen hierarchischen Planungsansatz nach Arnold (2008, S. 425 ff.) integriert erfolgen müssen.

In dieser Arbeit wird ein simulationsbasierter Ansatz zur Standortsuche in volatilen Distributionssystemen entwickelt, der taktische und operative Planung integriert. Ziel ist es, unter Berücksichtigung sowohl operativer als auch taktischer Ziele einen geeigneten Standort für ein Distributionszentrum zu finden. Anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Bauzulieferindustrie wird gezeigt, dass der entwickelte Ansatz gute Ergebnisse in der Optimierung der Transport- und Standortkosten erzielt. Das Anwendungsbeispiel umfasst ein Distributionsnetzwerk mit mehrstufiger Belieferung über Cross Docks mit mehr als 5.000 Distributionspunkten.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die grundlegende Problemstellung der Standortsuche wird in der Wissenschaft unter dem Begriff Location Routing Problem (LRP) behandelt. Ein guter Überblick über dieses Forschungsfeld findet sich in Prodhorn (2014) und Nagy (2007). Besonders häufig wird dabei die Tabu Search Methode angewendet (Prins 2007; Ting 2013; Escobar 2013). Für das Location Routing Problem existieren jedoch noch keine umfänglichen Softwareprogramme am Markt.

Im speziellen Fall der Standortsuche für die Distribution werden vielfach Simulationsstudien zur Bewertung von alternativen Konfigurationen mehrstufiger Distributionsnetzwerke verwendet. Dabei unterscheidet sich die Simulation mehrstufiger Distributionsnetzwerke von gängigen Simulationsmodellen in der Literatur. Im hier beschriebenen Anwendungsfall wird die Simulation mit einer Routenoptimierung sowie der Planung der Werksverkehre kombiniert, um kosteneffiziente Routenführung zu ermöglichen.

Arnaout (2010) simuliert den Materialfluss von Distributionszentren zum Kunden über Cross Docks, wobei Kundenlieferungen in Cross Docks konsolidiert werden. Galbreth (2008) vergleicht mit Hilfe einer Simulation die direkte Belieferung der Kunden mit der Belieferung über Cross Docks. Cooper (2014) beschreibt eine ereignis-diskrete Simulation zur Entscheidung über zusätzliche Cross Dock Standorte.

Die beschriebenen Simulationsansätze beziehen sich ausschließlich auf die Distributionsstruktur und gehen nicht auf die branchenspezifischen Lieferanforderungen der Bauzuliefererindustrie in Form von Servicelevel und Volatilität des Bestellverhaltens ein. Des Weiteren ist im speziellen Anwendungsfall dieses Beitrags die Abhängigkeit der Distributionsstruktur vom Produktionsnetzwerk zu berücksichtigen, welche die Anbindung aller Produktionsstandorte zueinander im Nachsprung innerhalb desselben Logistiknetzwerks erfordert.

Die am Markt gängigen Softwareprogramme zur Gestaltung komplexer Supply Chain Netzwerke (z. B. IBM ILOG LogicNet Plus) ermöglicht die integrierte Darstellung von Produktions- und Distributionsstruktur bei vergleichsweise geringem Implementierungsaufwand. Diese Planungsprogramme basieren jedoch in der Regel auf dem Hub-Location Problem (HLP). Ein guter Überblick über dieses Forschungsfeld findet sich in Campbell (2012) und Farahani (2013). Da das HLP dem hierarchischen Planungsansatz folgt, kann keine integrierte Transportroutenplanung erfolgen, wodurch eine zweistufige Vorgehensweise notwendig wird.

3 Simulationsstudie zur Kostenoptimierung volatiler Distributionssysteme am Beispiel der Bauzulieferindustrie

Um die spezifische Problemstellung mit Hilfe der Branchensoftware IBM ILOG LogicNet Plus zu lösen, hat ifp consulting ein zweistufiges Vorgehen zur Modellbildung und anschließenden Kostenoptimierung volatiler Distributionssysteme in Form einer Simulationsstudie entwickelt (vgl. Abb. 1).

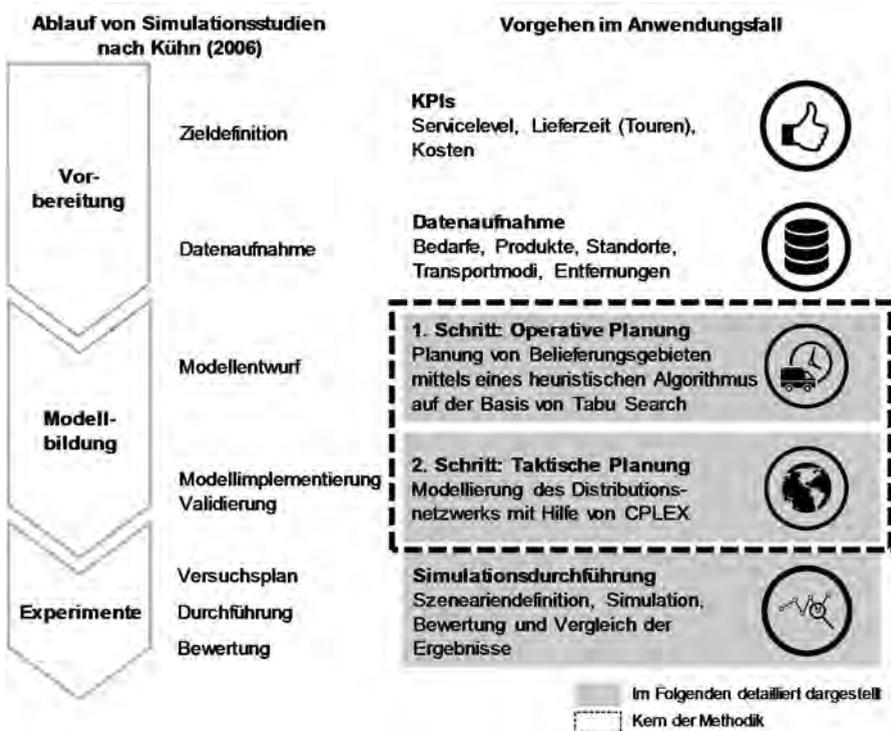


Abbildung 1: Zweistufiges Vorgehen für die integrierte Standortsuche

Zunächst wird anhand des definierten Umfangs des Simulationsmodells eine geeignete, integrierte Datenbasis geschaffen. Im Anwendungsfall werden zu diesem Zweck alle Kundenbestellungen im Zeitraum eines Jahres betrachtet.

Anschließend werden im Rahmen der Abstraktion der Problemstellung mit Hilfe eines selbstentwickelten Optimierungsprogramms Belieferungsgebiete (Schritt 1) festgelegt, welche die Transportrouten repräsentieren. In Schritt 2 erfolgt die Modellierung und anschließende Lösung der Distributionsaufgabe durch Simulation. Abschließend werden Simulationsstudien in Form von Standortvariation und Bedarfsänderungen durchgeführt, die bewertet und verglichen werden.

3.1 Schritt 1: Operative Planung

Die Ebene der operativen Planung ist nicht Bestandteil des Hub-Location Problem und kann daher mit gängigen Softwareprogrammen zur strategischen Distributionsplanung und Standortsuche abgebildet werden.

Die im Anwendungsfall sehr volatilen Kundenbedarfe erfordern jedoch eine integrierte Simulation. Dieser Forderung wird in einer neuartigen Methode der Tourenplanung nachgekommen, die mittels Tabu Search geeignete Belieferungsgebiete auf abstrahierter Ebene der Landkreise definiert (Jain 2001).

Tabu Search ist ein iteratives, metaheuristisches Verfahren auf Basis einer Local Search Heuristik, das Lösungen für komplexe Optimierungsprobleme sucht und lokale Optima mittels einer Tabuliste umgeht (Gendreau 2003). Die Einsatzmöglichkeit für Tabu Search im LRP ist groß: Während einige Ansätze sowohl die Location als auch die Routing Entscheidung mit Hilfe der Tabu Search lösen, fokussieren andere Ansätze darauf, eine Neuordnung der Kunden zu bestimmen.

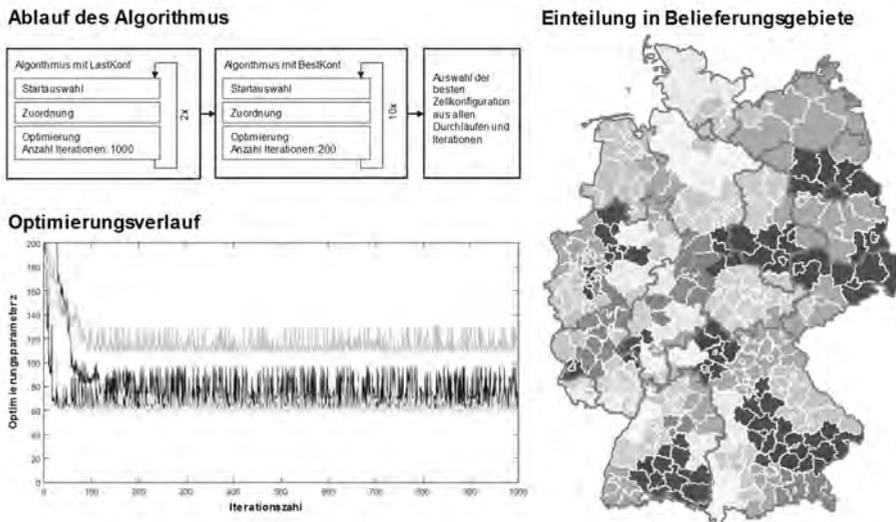


Abbildung 2: Vorgehen und Ergebnis der Metaheuristik zur Bestimmung von Belieferungsgebieten

Ziel der entwickelten Metaheuristik ist es, die Landkreise in geographisch zusammenhängende Belieferungsgebiete gleicher Belieferungsintensität einzuteilen. Für jeden Distributionspunkt wird hierzu zunächst eine dimensionslose Kundenbelieferungskennzahl (K-BKZ) bestimmt. Diese setzt sich aus der Anzahl der

Lieferungen und dem gelieferten Produktvolumen zusammen und repräsentiert damit die begrenzenden Faktoren Fahrzeit und Transportvolumen der Distributionstouren.

Die Distributionspunkte werden dem jeweiligen Landkreis zugeordnet, dessen Landkreisbelieferungskennzahl (L-BKZ) durch Summierung der K-BKZ gebildet wird. Die L-BKZ bildet zusammen mit den Geokoordinaten der Landkreismittelpunkte sowie einer Nachbarschaftsmatrix die Eingangsdaten der Metaheuristik.

Mithilfe der k-center-Methode wird nun eine zufällige Initiallösung generiert, in der die Landkreise zu einer Anzahl an zusammenhängenden, kompakten Clustern zusammengefasst und die Clustersummen der L-BKZ gebildet werden. Anschließend werden mittels Tabu-Search zufällig Kreise zwischen Clustern getauscht und die empirische Standardabweichung der Clustersummen der neuen Aufteilung kalkuliert. Durch wiederholtes Vorgehen erfolgt unter Berücksichtigung der Kompaktheit über mehrere Tausend Iterationen eine Einteilung in homogene Belieferungsgebiete. Im Anwendungsbeispiel wurden die 401 Landkreise und kreisfreien Städte Deutschlands in 62 Belieferungsgebiete aufgeteilt (vgl. Abb. 2) und erfolgreich mit dem Kunden validiert.

3.2 Schritt 2: Aufbau und Parametrisierung des Simulationsmodells

Im Rahmen der Modellierung werden die aufgenommenen Daten und die ermittelten Belieferungsgebiete in die Simulationsumgebung von IBM LogicNet Plus überführt, wie Abbildung 3 zeigt.

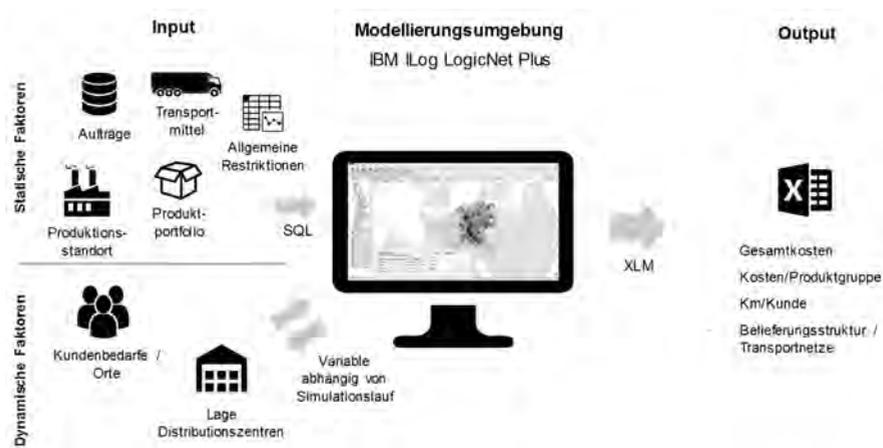


Abbildung 3: Vorgehen für Aufbau und Parametrisierung des Simulationsmodells

Bei der Modellierung des Transportnetzwerks ergibt sich aufgrund der Distribution in Touren die Herausforderung, dass in IBM LogicNet Plus Transporte nur als Direktverkehre modelliert werden können. Die Vereinfachung von Transportrouten zu Direktverkehren stellt jedoch eine unzureichende Näherung der Realität dar (Salhi und Rand 1993). Daher wird die Distributionsstruktur in der Form modelliert, dass die Verteilung innerhalb der Belieferungsgebiete von der Anfahrt zum Belieferungsgebiet getrennt wird. Für die Anfahrt in das Belieferungsgebiet erfolgt die

Bestimmung die realen Straßenkilometer über eine Integration der Google Maps API. Anschließend werden die Transportkosten pro Kunde und Belieferung innerhalb eines Belieferungsgebietes in Anlehnung an Daganzo (1984) ermittelt. Dabei wird die pro Kunde und Belieferung anfallende Fahrtstrecke unter Berücksichtigung der Größe des Belieferungsgebiets sowie der Anzahl der Stopps pro Tour bestimmt.

$$\text{Distanz pro Kunde} = \sqrt{\frac{\text{Fläche}(\text{Beliieferungsgebiet})}{\emptyset \text{Anzahl Stopps pro Tour}}} \quad (1)$$

Zudem wird berücksichtigt, dass alle fünf Produktionsstandorte durch einen mit den Distributionstransporten verschränkten Werksverkehr täglich miteinander zu verbinden sind. Dies beinhaltet insbesondere die enge zeitliche Koordination der Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Der Freiheitsgrad des Optimierungsmodells besteht in der Zuordnung der Belieferungsgebiete zu einem Distributionsstandort sowie der Auswahl des geeigneten Eintrittspunktes. Die Modellierung der beschriebenen Netzwerkstruktur wird abschließend im Anwendungsbeispiel validiert. Dazu wurden die Gesamtkosten des Netzwerks mit den Ist-Kosten abgeglichen. Dabei wurde im ersten Schritt eine Abweichung von nur 3,4 % zum Ist-Zustand gemessen. Nach anschließender Kalibrierung des Modells konnte diese Abweichung auf 0,1 % reduziert werden.

3.3 Durchführung der Simulationsstudie

Im Rahmen der Durchführung der Simulationsexperimente wird wie in Abb. 4 dargestellt vorgegangen:

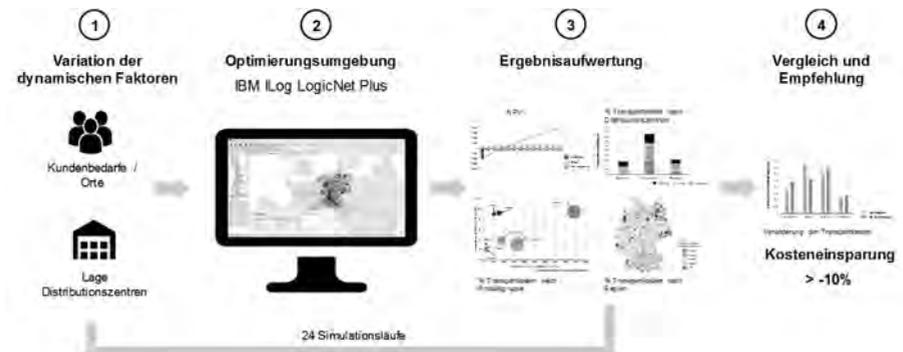


Abbildung 4: Vorgehen in der Durchführung der Simulationsstudie

Mögliche Distributionsstandorte werden anhand logistischer, wirtschaftlicher und unternehmensspezifischer Kriterien festgelegt. Anhand dieser Kriterien entsteht ein Versuchsplan, der 12 mögliche Standorte umfasst. Anschließend werden die Transportrelationen zwischen Produktions- und Distributionsstandorten, sowie zwischen Distributionsstandorten und Kunden abgebildet und die dazugehörigen Transportkosten parametrisiert. Die Parametrisierung der Kosten umfasst Standort-, Lohn- und Transportkosten. Für die Standort- und Lohnkosten werden regionale Kostenunterschiede gemäß der amtlichen Statistik sowie Erfahrungswissen von ifp

consulting berücksichtigt. Die Transportkosten werden distanzabhängig auf Basis unternehmensinterner Daten bestimmt. Anschließend werden Simulationsversuche in Form von Änderungen der Distributionsstandorte sowie der Kundenbedarfe auf ein Zukunftsszenario durchgeführt. Zur simulativen Optimierung wird das entwickelte Modell in ein mathematisches Gleichungssystem überführt und mit Hilfe von CPLEX gelöst. Die Ergebnisse der simulativen Optimierung der einzelnen Szenarien umfassen Transportkosten für den Optimierungszeitraum sowie die notwendigen Standortkapazitäten. Anhand der Verteilung der Transportkosten zwischen Werksverkehren, Verteiltouren und Anfahrten in die Belieferungsgebiete sowie der resultierenden Standortkosten für Aufbau und Betrieb der jeweiligen Standortalternative werden die Szenarien bewertet und verglichen. Die Gesamtkosten in Form von Standort- und Transportkosten bilden anschließend die quantitative Grundlage für die Handlungsempfehlung zur Standortwahl für das neue Distributionszentrum.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Beitrag wird eine Methodik beschrieben, welche volatile Distributionssysteme unter Einbezug der verbindenden Werksverkehre zwischen den Produktionswerken simuliert und optimiert. Hierzu wurde ein zweistufiges Vorgehen entwickelt, welches im ersten Schritt zunächst eine geeignete Abstraktion der volatilen Belieferung mittels Tabu Search vornimmt. Im zweiten Schritt erfolgt, basierend auf der zuvor abstrahierten Distributionsaufgabe und mit Hilfe des Softwareprogramms IBM ILOG LogicNet Plus, die Simulation des Distributionssystems mit dem Ziel, eine kostenoptimale Standortkonfiguration zu ermitteln.

Durch die entwickelte Methodik können im Anwendungsbeispiel die Gesamtkosten, insbesondere die Transport- und Lagerkosten, für den Ist-Zustand im ersten Versuch auf kleiner 0,1 % Abweichung bestimmt und somit das Simulationsmodell und die Abstraktion mittels Tabu Search validiert werden. Ferner konnte durch die Simulation eine umfangreiche Kostentransparenz auf Kunden- und Produktebene erzielt werden.

In der Simulationsstudie wird ein Potential von Gesamtkosten größer 10 % ermittelt werden. Dabei werden zwei neue Distributionsstandorte identifiziert, welche sich an bereits bestehende Produktionsstandorte anschließen, sodass auch der Werksverkehr wie gefordert im Nachtsprung abgebildet werden kann. Das Vorgehen führt zu sehr guten und genauen Ergebnissen bei hoher Kundenakzeptanz. Die Kosten zur Durchführung der simulativen Optimierung werden durch die ermittelten Einsparungen in zwei Wochen amortisiert. Zukünftig kann die Methodik um weitere geografische Regionen mit ihren jeweiligen administrativen Gebietsaufteilungen erweitert werden.

Literatur

- Arnaut, G.; Rodriguez-Velasquez, E.; Rabadi, G.; Musa, R.: Modeling cross-docking operations using discrete event simulation. In: Barjis, J.; Narasipuram, M. M.; Rabadi, G.; Ralyté, J.; Plebani, P. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Workshop on Enterprise & Organizational Modeling and Simulation (EOMAS), Hammamet (Tunesien), 2010, S. 113-120.
- Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

- Bruns, A. D.: Zweistufige Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten: primale Heuristiken und lokale Suchverfahren. Dissertation Universität St. Gallen, Institut für Operations Research und Computational Finance, Difo-Druck GmbH: Bamberg 1998.
- Campbell, J. F.; O'Kelly, M. E.: Twenty-five years of hub location research. *Transportation Science* 46 (2012) 2, S. 153-169.
- Cooper, K.; Wikum, E.; Tew, J.: Evaluating cost-to-serve for a retail supply chain. In: Tolk, A.; Yilmaz, L.; Diallo, S. Y.; Ryzhov, I. O.; Buckley, S.; Miller, J. A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference (WSC), Savannah (USA), 2014*, S. 1955-1964.
- Daganzo, C. F.: The length of tours in zones of different shapes. *Transportation Research Part B: Methodological* 18 (1984) 2, S. 135-145.
- Escobar, J. W.; Linfati, R.; Toth, P.: A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem. *Computers and Operations Research* 40 (2013) 1, S. 70-79.
- Farahani, R. Z.; Hekmatfar, M.; Arabani, A. B.; Nikbakhsh, E.: Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering* 64 (2013) 4, S. 1096-1109.
- Galbreth, M. R.; Hill, J. A.; Handley, S.: An investigation of the value of cross-docking for supply chain management. *Journal of Business Logistics* 29 (2008) 1, S. 225-239.
- Gendreau, M.: An introduction to tabu search. In: Glover, F.; Kochenberger, G. A. (Hrsg.): *Handbook of metaheuristics*. New York: Springer 2003, S. 37-54.
- Hemmelmayr, V. C.; Cordeau, J. F.; Crainic, T. G.: An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. *Computers & operations research* 39 (2012) 12, S. 3215-3228.
- Jain, S.; Workman, R. W.; Collins, L. M.; Ervin, E. C.; Lathrop, A. P.: Development of a high-level supply chain simulation model. In: Peters, B. A.; Smith, J. S.; Medeiros, D. J.; Rohrer, M. W. (Hrsg.): *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference (WSC), Arlington (USA), 09.-12. Dezember 2001*, IEEE Computer Society, S. 1129-1137.
- Kühn, W.: *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München: Hanser 2006.
- Nagy, G.; Salhi, S.: Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research* 177 (2007) 2, S. 649-672.
- Prins, C.; Prodhon, C.; Ruiz, A.; Soriano, P.; Wolfler-Calvo, R.: Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science* 41 (2007) 4, S. 470-483.
- Prodhon, C.; Prins, C.: A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research* 238 (2014) 1, S. 1-17.
- Salhi, S.; Rand, G. K.: Incorporating vehicle routing into the vehicle fleet composition problem. *European Journal of Operational Research* 66 (1993) 3, S. 313-330.
- Ting, C.-J.; Chen, C.-H.: A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *International Journal of Production Economics* 141 (2013) 1, S. 34-44.
- Vincent, F. Y.; Lin, S. W.; Lee, W.; Ting, C.-J.: A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers & Industrial Engineering* 58 (2010) 2, S. 288-299.

Strategisch-taktische Planung und Gestaltung von Produktionsnetzwerken für die schiffbauliche Fertigung mithilfe der Materialflusssimulation

Strategic-tactical Planning and Design of Production Networks in the Field of Ship Production Using Material Flow Simulation

Jan Sender, Benjamin Illgen, Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der
Produktionstechnik IGP, Rostock (Germany), jan.sender@igp.fraunhofer.de,
benjamin.illgen@igp.fraunhofer.de

Abstract: The global seaborne transportation of goods is increasing continuously as well as the demand for cruises. Coincidentally, ordered ships become bigger without allowing a longer time-to-market. Therefore, dividing labour among different shipyards has turned into a common way to realise these large-scale projects. This practice leads to a wider range of manufacturing parameters compared to single factory production which stands in contrast to the shipyards comparatively low level of digitisation. On that account, a simulation platform has been developed to support the design and the strategic-tactical planning processes of production networks, fulfilling the branch-specific requirements. In this work the involved production sites were modelled separately, followed by the definition of interdependencies like capacity limits, strengths and weaknesses, the product hierarchy or delivery dates. Finally, the required spatial capacities for each site were defined, the division of labour was optimised, bought-in parts were determined and milestones were set.

1 Ausgangssituation

Der globale Handel nahm mit Ausnahme des Ausbruchs der Weltwirtschaftskrise im Jahre 2008 in den vergangenen Jahrzehnten stetig zu. Die OECD prognostiziert, dass sich dieser Trend auch zukünftig fortsetzen wird (Gurria und Mann 2016). Folgerichtig steigt auch der weltweite wassergebundene Warentransport – zu erkennen beispielsweise am anwachsenden Containerumschlag (RWI/ISL 2017) – und damit der Bedarf an Beförderungskapazität. Des Weiteren nimmt auch die Nachfrage an Kreuzfahrten jährlich zu (Deutscher Reiseverband 2014), sodass konstatiert werden kann, dass auch in Zukunft in Summe mit einer steigenden Zahl an Beauftragungen von Schiffneubauten zu rechnen ist, wobei hier auf Jahre bezogen von sehr starken Schwankungen auszugehen ist.

Da für viele Küstenstaaten der Schiffbau einen strategisch wichtigen Industriezweig darstellt, wird weltweit nach Maßnahmen gesucht, die eigene Position am umkämpften Markt zu finden, zu etablieren bzw. zu festigen. Dabei ist es besonders wichtig, ein hohes Maß an Flexibilität sicherzustellen, denn durch externe Faktoren wie Krisen, Technologieentwicklung in der Schiffstechnik, rechtliche Rahmenbedingungen oder die lange Lebensdauer heutiger Schiffe, lässt sich der Markt als sehr volatil charakterisieren.

Neben der klassischen Vergabe von Neubaufträgen an einzelne Werften erfolgt zunehmend eine Arbeitsteilung zwischen verschiedenen Werftstandorten, sodass hier von einer Auftragsbearbeitung in schiffbaulichen Produktionsnetzwerken gesprochen werden kann. Beispiele hierfür aus dem deutschen Raum sind die vier deutschen Fregatten F125 der Klasse „Baden-Württemberg“, welche durch ThyssenKrupp Marine Systems, die Friedrich Lürssen-Werft sowie durch Blohm+Voss Shipyards gefertigt werden. Repräsentant dieser Entwicklung ist auch die Werftengruppe MV-Werften, welche an insgesamt drei Standorten in Mecklenburg-Vorpommern Passagierschiffe unterschiedlicher Größenklassen arbeitsteilig bauen wird. Ein weiteres Beispiel bietet die Meyer Werft in Papenburg, welche zukünftig komplette schwimmfähige Maschinenraummodule in Rostock fertigen lassen will. Die Gründe hierfür liegen in dem Trend zur Beauftragung immer größerer Schiffe bei gleichbleibender Time-to-Market, sodass das Arbeitsvolumen aufgeteilt werden muss, um die vereinbarten Terminziele halten zu können. Weiterhin bietet die Arbeitsteilung die Möglichkeit für einzelne Standorte, sich auf Schiffsbereiche, z. B. das Maschinenraummodul, zu spezialisieren und somit weitere Produktivitätspotenziale zu erschließen.

Auf internationaler Ebene lässt sich zudem eine weitere Entwicklung ausmachen, welche zur Arbeitsteilung unter verschiedenen Werftstandorten führt. Aufgrund geringer werdender staatlicher Nachfrage im Feld des Militärschiffbaus, bedingt durch neue Methoden der Verteidigungstechnik, verteilen die auftraggebenden Nationen in jüngster Vergangenheit Schiffsneubauten in Form von Arbeitspaketen an mehrere Standorte. Die Beweggründe dafür liegen in der fairen Verteilung öffentlicher Aufträge sowie in der Aufrechterhaltung der nationalen Schiffbaukapazitäten durch gezielte Auftragsvergabe. Durch die steigenden technisch-technologischen Anforderungen an solche Sonderschiffe kann so – trotz geringer werdender Stückzahlen – eine gute Auslastung mehrerer Werftstandorte erreicht werden. Beispiele für diese Praxis finden sich derzeit in Großbritannien beim Bau des Flugzeugträgers „Queen Elizabeth“, an dessen Entstehung insgesamt sieben verschiedene Standorte mitwirken. An drei dieser Standorte wird zudem der britische Zerstörer des Typs „45“ produziert. Weitere Beispiele finden sich in den USA mit den U-Booten der „Virginia“ Klasse (zwei Produktionsstandorte) sowie den Zerstörern der „Zumwalt“ Klasse (drei Produktionsstandorte). Auch Frankreich setzt bei seinen Hubschrauberträgern der „Mistral“ Klasse auf die Fertigung in einem Produktionsnetzwerk, wobei zwei französische Standorte und eine polnische Werft involviert sind (Kulkarni 2015).

Die beschriebene Tendenz führt dazu, dass Werften bzw. Werftengruppen vor neuen planerischen Herausforderungen stehen, denen es durch geeignete Verfahren und Methoden zu begegnen gilt. Dieser Beitrag behandelt dabei den Ansatz der Materialflusssimulation zur organisatorischen, kapazitiven sowie technologischen Planung von schiffbaulichen Produktionsnetzwerken mit besonderer Betrachtung der

Realisierbarkeit von Produktionsaufträgen sowie etwaiger Ableitung von notwendigen Investitionsbedarfen.

2 Entwicklung der simulationsgestützten Planung in der Schiffbauindustrie

Der Schiffbau hat im Vergleich zu anderen Branchen wie der Automobilindustrie einen geringeren Digitalisierungsgrad in Planung und Betrieb der Produktion. Grund dafür sind die Randbedingungen der Branche wie z. B. die Unikatfertigung sowie die sehr hohe Komplexität der zu fertigenden Produkte. In den vergangenen Jahren fand jedoch ein Umdenken statt, sodass immer mehr moderne Verfahren und Methoden insbesondere aus dem Gebiet der Digitalen Fabrik Einzug in den Schiffbau hielten, darunter auch die Simulationstechnik. Hier nehmen besonders deutsche Werften eine Vorreiterrolle am Weltmarkt ein.

Zunächst sei an dieser Stelle das Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft genannt. Dabei handelt es sich um einen Bausteinkasten auf Basis der Software Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Dieser ermöglicht die Modellierung und Simulation von Stahlbau- und Ausrüstungsprozessen einschließlich der relevanten Abhängigkeiten (Steinhauer 2011). In dem Projekt SimCoMar wurde das STS um verschiedene funktionelle Aspekte erweitert (Steinhauer und Meyer-König 2006). Ebenfalls auf dem STS fußte das Forschungsprojekt SIMoFIT, das sich mit der detaillierten Simulation von Ausbauprozessen befasste (König et al. 2007). Die Forschungsprojekte SIMGO, GeneSim und HEPP erweiterten das STS um mathematische Optimierungsmethoden bzw. um ein generisches Datenmanagement (Steinhauer und Wagner 2008; Steinhauer et al. 2011; Steinhauer et al. 2017). Letzteres wurde ebenfalls von Burnett et al. (2008) untersucht und auf Basis einer alternativen Software umgesetzt.

Ljubenkov et al. (2008) setzen mit ihrem Simulationsmodell auf der Plattform Enterprise Dynamics auf. Sie beschreiben den schiffbaulichen Produktionsplanungsprozess auf Ebene der Teilefertigung in Bezug auf Ressourcenbelegung und Auslastung sowie die Bereitstellung von Daten zur Entscheidungsfindung. Dahingegen wurde im Rahmen des Projekts SimYard ein Simulationstool entwickelt, das bei auftretenden Problemen in der schiffbaulichen Produktion, wie z. B. Terminverzug, die kostenoptimale Gegenmaßnahme mithilfe von Regressionsmethoden generiert (Dain et al. 2006). Im Gegensatz zu diesem globalen schiffbaulichen Ansatz steht bei der ereignisdiskreten Simulation des Projektes DESTINY speziell die Optimierung der Plattenbearbeitungsprozesse im Fokus. Das Modell wird dabei webbasiert durch eine überschaubare Zahl an Schritten zusammengestellt. Es werden Modernisierungsstrategien untersucht, Empfehlungen abgeleitet und die Vorzugsvariante abschließend visualisiert (Medeiros et al. 2000).

In jüngster Vergangenheit wurde im Rahmen des bereits erwähnten Verbundvorhabens HEPP eine simulationsgestützte Planungsplattform entworfen, die besonders in der Unikatfertigung, also auch und gerade im Bereich des Schiffbaus, einen Benefit bezüglich unzureichender Eingangsdaten erzielen soll. So wurde das Werkzeug AnteSim entwickelt, welches es ermöglicht, in frühen Phasen der Planung die noch unvollständigen Datensätze mit zusätzlichen Informationen anzureichern, bevor eine Simulation durchgeführt wird. Zudem wurde ein Algorithmus zur

Quantifizierung von Unschärfen konzipiert, sodass Korridorszenarien je nach Datengüte erstellt werden können (Steinhauer et al. 2017).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die wissenschaftlichen Publikationen sich ausschließlich auf die Planung der Produktion an einem Standort konzentrieren. Verteilte Produktionssysteme im Bereich der schiffbaulichen Fertigung sind in den wissenschaftlichen Untersuchungen bisher noch nicht behandelt worden.

Außerhalb des Themenfeldes Schiffbau lassen sich einzelne wissenschaftliche Ansätze zur Simulation von Produktionsnetzwerken finden. Diese beziehen sich jedoch auf die Idee eines Großkonzerns, also auf hierarchisch aufgebaute Produktionssysteme, wobei jeder Standort eine feste Aufgabe hat bzw. ein Zulieferprodukt einer unteren Ordnung als Output generiert. Dabei wurden Auswirkungen von Entscheidungs-Wirkungs-Beziehungen innerhalb der internen Lieferketten untersucht, sodass keine Materialflusssimulation zur Anwendung kam (Lanza und Book 2010; Nayabi 2005).

Das hier im Fokus stehende Simulationswerkzeug bildet ein ganzheitliches Konzept für die Schiffsfertigung innerhalb von Produktionsnetzwerken ab. Dies bringt z. B. mit sich, dass Produktkomponenten gleicher Ordnung auf verschiedene Standorte gleicher Hierarchieebene aufgeteilt werden müssen. Somit potenziert sich der Parameterraum, da nicht nur Abhängigkeiten innerhalb der Fertigungsstufen einer Werft, sondern auch zwischen den betrachteten Standorten bestehen. So ist beispielsweise das Produktionsprogramm, welches ein einzelner Standort abzuarbeiten hat, im Vorfeld nicht fest definiert, da der Material Break Down – also die Einteilung des zu fertigenden Schiffes in einzelne Baugruppen – und dessen Standortverteilung Teil der Simulationsoptimierung ist.

3 Simulation von Produktionsnetzwerken in der schiffbaulichen Fertigung

Das durch die Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) entwickelte Simulationswerkzeug basiert auf der Siemens PLM Software Tecnomatix Plant Simulation und wurde bereits mehrfach bei Werftplanungsprojekten im internationalen Umfeld eingesetzt. Auf Basis der zunehmenden Anzahl von Projekten mit dem Charakter von Produktionsnetzwerken wurde mithilfe der ereignisdiskreten Simulation ein Ablaufmodell zum Zwecke der Planungsoptimierung abgeleitet, um den damit verbundenen Anforderungen gerecht zu werden. Den strukturellen Aufbau des Simulationswerkzeuges zeigt Abbildung 1 schematisch.

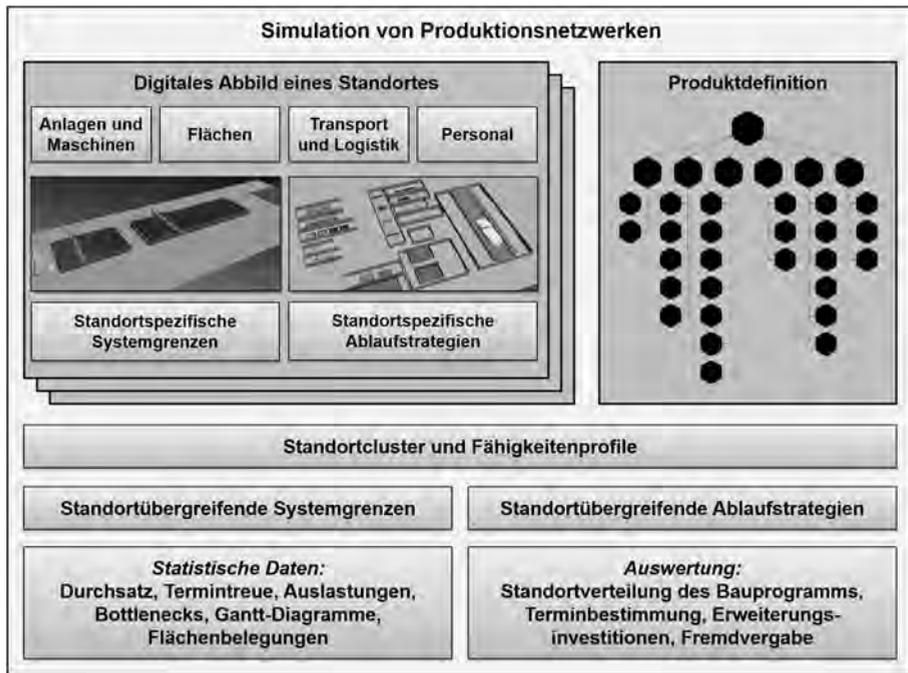


Abbildung 1: Struktureller Aufbau des Simulationswerkzeugs

In der ersten Phase der Modellbildung werden die Produktionsstandorte mit ihren jeweiligen Kapazitäten erzeugt. Dabei muss die Produktionsstruktur in das Simulationsmodell übersetzt werden. Diese umfasst den Maschinen- und Anlagenpark, Montageflächen sowie Puffer und Lagerflächen. Die zugrunde liegende Software stellt hierfür spezielle Bausteine wie Einzelstationen oder Montagestationen zur Verfügung. Diese werden über verschiedene Materialflusselemente und quelltextbasierte Steuerungen miteinander verbunden, sodass ein realitätsnaher Materialfluss erstellt werden kann. Da die Entwicklung der Basissoftware vor allem durch die Automobilindustrie getrieben ist, ergibt sich allerdings die Notwendigkeit, zusätzlich schiffbauspezifische Bausteine zu entwickeln, da die branchenspezifischen Gegebenheiten mit den Standardelementen nicht hinreichend abgebildet werden können. So wurde zum Beispiel eine Montagefläche implementiert, auf der Sektionen und Module je nach Verfügbarkeit der Fläche angeordnet werden. Dementsprechend muss keine absolute Bauplatzanzahl definiert werden. Die jeweilig zur Verfügung stehende Kapazität wird vielmehr durch die Abmaße der Bearbeitungsobjekte determiniert. Des Weiteren wurde die Software um schiffbautypische Produktionsstrategien erweitert. So beginnt im Schiffbau ein Montageprozess nicht erst bei der Verfügbarkeit von den ersten beiden Montageobjekten, sondern die Bearbeitung beginnt schon mit dem Ausrichten der ersten bereitgestellten Baugruppe, sodass der Prozess ohne das Vorhandensein des zweiten Montageobjektes beginnt. Ein weiteres Beispiel für diese Strategien bilden die Montageparallelitäten. So erfolgt beispielsweise die Bearbeitung in der Dockmontage nicht sequentiell, sondern – abhängig vom jeweiligen Baufortschritt – überlappend. Auch beschränkende Parameter wie Torgrößen oder maximal verarbeitbare Materialstärken werden den Fertigungsentitäten hinterlegt.

Sind die einzelnen Produktionskapazitäten definiert, werden zudem Transportmittel und Mitarbeiter quantitativ und qualitativ bestimmt. Auch auf diesem Feld wurden schiffbauliche Besonderheiten in das Modell implementiert. Ein Beispiel hierfür ist die Haltezeit. Ist ein Transport üblicherweise abgeschlossen und ist das Transportmittel somit wieder frei, bevor mit der Bearbeitung eines Bauteils begonnen wird, so halten Krane im Schiffbau Baugruppen auch noch während der eigentlichen Montage in Position, bis die Verbindung eine ausreichende Stabilität aufweist. Das Transportmittel wird also erst nach Bearbeitungsbeginn wieder freigegeben. Als Ergebnis der zuvor beschriebenen Modellierungsphase liegen die Produktionsstandorte mit ihrem jeweiligen Kompetenzprofil in digitaler Form vor.

Den nächsten Schritt stellt die Definition des Produktionsprogramms dar. Hierfür wird aus Konstruktionsdaten eine Produktstruktur abgeleitet. Aus Gründen der Simulationsperformanz und der verfügbaren Datengranularität bilden zumeist Platten und Profile die unterste Ebene in dieser Hierarchie. Dem sich daraus ergebenden Strukturbaum müssen darauffolgend Arbeitspläne zugewiesen werden. Dazu zählen anfallende Bearbeitungsschritte, den dafür erforderlichen Anlagentyp sowie Bearbeitungs- und Liegezeiten. Diese resultieren entweder aus Projektplänen oder werden produktparameterabhängig bestimmt, sofern geeignete Produktivitätskennzahlen vorliegen.

Nach Abschluss der produkt- und produktionsseitigen Definition des Modells erfolgt dann die eigentliche Verknüpfung des Produktionsnetzwerkes. Hierbei werden gleichartige Anlagen bestimmt und gegebenenfalls mit einem Produktivitätsfaktor gewichtet. Die Produkteigenschaften der Erzeugnisstruktur werden mit den Produktparametergrenzen der jeweiligen Fertigungskapazität abgeglichen und so nötige fixe Zuordnungen von Baugruppen zu Standorten vorgenommen. Gleiches geschieht auch durch Analyse der Arbeitspläne nach notwendigen Anlagentypen. Anschließend können Präferenzen festgelegt werden, sodass Stärken von einzelnen Standorten gezielt genutzt werden können. Beispielsweise kann – abhängig von vergangenen Aufträgen und Erfahrungen des Personals – ein Standort deutlich mehr Kompetenzen auf bestimmten Themengebieten vorweisen, ohne dass sich dies in der Produktionsstruktur niederschlägt. Der Bau gekrümmter Schiffsstrukturen ist hierfür ein typisches Beispiel. Aus diesen Vorbetrachtungen ergibt sich eine erste Material- bzw. Baugruppenverteilung auf die jeweiligen Standorte und bildet somit die Ausgangsbasis für den eigentlichen Simulationsvorgang.

Für eine optimale Aufteilung des Produktionsprogrammes auf die Standorte müssten alle möglichen Baugruppe-Standort-Kombinationen simuliert werden. Da die Bauteilanzahl eines Schiffes, selbst wenn bis auf die Ebene der Platten und Profile abstrahiert wird, nicht selten fünfstellig ist, wird auf diese Vorgehensweise in den meisten Fällen verzichtet, da die nötige Rechenzeit nicht vertretbar erscheint. Daher wird sich in der Regel impliziten Expertenwissens bedient, um eine sinnvolle Verteilung der nicht fix zugeteilten Baugruppen vorzunehmen. Hierbei fließen Aspekte wie die Überführung von Sektionen über Land oder Wasser in die Überlegungen ein. Erste Ansätze zur programmseitigen Unterstützung sind bereits implementiert. So findet vor Simulationsbeginn z. B. eine Plausibilitätsprüfung dahingehend statt, ob eine über Wasser zu transportierende Einheit schwimmfähig ist (Lückenlosigkeit, Vollständigkeit des Rumpfteils). Im Regelfall werden für die Standortverteilung verschiedene Szenarien aufgestellt, die anschließend nacheinander simuliert werden, indem die einzelnen Kapazitäten entsprechend der definierten Rahmenbedingungen belastet werden. Hierbei werden die besonderen Potenziale der Simulation deutlich.

So werden die reihenfolgebedingten Abhängigkeiten, die zu unerwünschten Liegezeiten führen können, realitätsgetreu abgebildet. Auch die Auswirkungen von Engpässen eines Standortes auf einen anderen werden durch die Simulation beachtet. Diese Interdependenzen lassen sich mit statischen Kalkulationsverfahren nicht abbilden.

Im Anschluss an jeden Simulationslauf werden die Ergebnisse der Simulation wie Durchlaufzeit, Termintreue, Anlagen- und Flächenauslastungen oder Bestände im Microsoft Excel Format exportiert. Durch die entwickelte Software wird dabei schon mithilfe einer farblichen Kennzeichnung eine vergleichende Auswertung der Szenarien vorgenommen, obgleich die endgültige Auswahl eines Vorzugsszenarios dem Planer obliegt. Sollten die Terminziele in keinem Szenario erreicht werden, bedarf es weiterführender Betrachtungen. Sind beispielsweise verschiedene Anlagen des gleichen Typs ungleichmäßig ausgelastet, weist die Software darauf hin und schlägt eine Standortumverteilung vor, die vom Planer angenommen, modifiziert oder abgelehnt werden kann. Des Weiteren kann der Planer Erweiterungsinvestitionen in das Modell einpflegen und mit diesen erneute Simulationsläufe durchführen oder aber das Schichtregime anpassen, um die Zielvorgaben zu erreichen. In letzter Instanz kann die Simulationsoption der Fremdvergabe gewählt werden. Hierbei führt die Software automatisch Iterationsschleifen durch, bei denen schrittweise Baugruppen einer zuvor gewählten Hierarchieebene aus dem Produktionsprogramm entfernt werden, bis die gesetzten Terminziele erreicht werden. Diese Baugruppen werden dann als Fremdvergaben markiert.

4 Anwendung des entwickelten Simulationsansatzes

Die Ausgangsbasis des in der Folge betrachteten Beispielprojektes bildeten zwei Wertstandorte mit bestimmtem Ressourcen- bzw. Kompetenzprofil, in dem jedoch auch bereits ausgelöste Erweiterungsinvestitionen Berücksichtigung gefunden haben. Außerdem wurde durch den Auftraggeber ein Bauprogramm zur Verfügung gestellt, welches zum Planungszeitpunkt noch nicht vollends auskonstruiert war. Demzufolge standen nicht alle Eingangsdaten für die Simulation initial zur Verfügung. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden Typenvertretersektionen an denjenigen Stellen bestimmt, an denen mit großer Sicherheit eine Vorhersage zu treffen war. Dies ist besonders bei geraden, wenig verformten Volumenkörpern der Fall. Dahingegen wurden im Bereich der gekrümmten Strukturen Daten von in der Vergangenheit gefertigten Schiffen verwendet. Die Aufteilung der Arbeitsinhalte auf die Produktionsstandorte wurde von einer Gruppe von erfahrenen Mitarbeitern erarbeitet. Dabei wurde ein Szenario erarbeitet, welches simulativ bewertet werden sollte. Von den Wissensträgern wurden dabei die zeitintensiven, gekrümmten Strukturen, welche sich besonders im Vor- und Achterschiffsbereich befinden, als elementarer Erfolgsfaktor ausgemacht. So wurde die Krümmung der Baugruppen als erstes Verteilungskriterium der Sektionen angewandt.

Auf Grundlage dessen wurden mehrere Simulationsläufe mit jeweils kleineren Anpassungen durchgeführt (Variation des Schichtsystems, Erhöhung der Transport- und Mitarbeiterverfügbarkeiten oder jahreszeitbedingten Produktivitätsschwankungen). Als Resultat jeder Iterationsschleife ergab sich, dass das Terminziel mit den gegebenen Ressourcen und Kapazitäten deutlich verfehlt werden würde, da die Konservierungskapazitäten beider Standorte in Summe nicht ausreichend dimensioniert sind. Um diesen Engpass aufzulösen wurde – wiederum in einem iterativen

Prozess – die Strategie der Standortkonservierung eingeführt. Dabei werden zu beschichtende Baugruppen am Errichtungsplatz eingehaust und vor Ort konserviert. Dieses Vorgehen führte dazu, dass sich der Engpass auf die Montageflächen für Volumenkörper verschoben hat. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten der Werften sollten weitere als die bereits inkludierten Erweiterungsinvestitionen in Form von Hallenneubauten nicht in Betracht gezogen werden. So ist es grundsätzlich die Prämisse, auftragsspezifische Investitionen zu vermeiden, da sich die zu fertigenden Schiffstypen im Zeitverlauf stark unterscheiden. Um dennoch die angestrebten Zielstellungen zu erreichen, mussten dementsprechend gewisse Teile des Produktionsprogramms fremdvergeben werden. Dafür wurden in der Folge wiederholt Simulationsläufe durchgeführt, wobei schrittweise Sektionen aus der Produktion ausgelagert wurden, bis der Engpass aufgelöst und das Terminziel erreicht werden konnte. Die ermittelte Standortverteilung des Produktionsprogramms ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wird deutlich, dass dem Standort A die gekrümmten Strukturen des Vor- und Achterschiffes zugeordnet wurden, während die Sektionen des Mittschiffes am Standort B verortet sind. Da das betrachtete Produktionsnetzwerk nicht die kapazitive Beschaffenheit aufweist, um die gegebenen Zielgrößen zu erreichen, wurden darüber hinaus Teile des Mittschiffes sowie das Deckshaus als zuzukaufende Baugruppen gekennzeichnet.

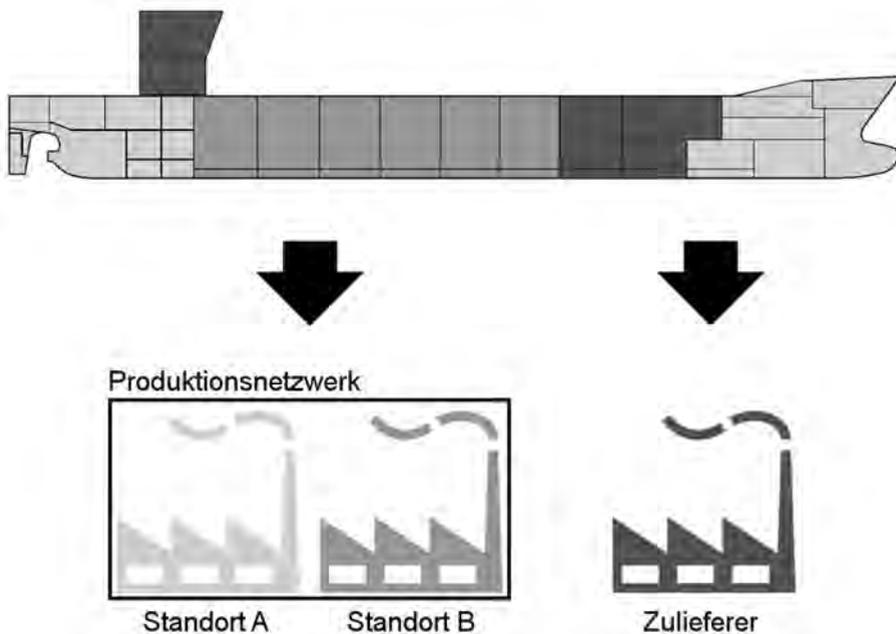


Abbildung 2: Standortverteilung des zu fertigenden Schiffes

5 Zusammenfassung

Das beschriebene Simulationswerkzeug wendet die klassischen Elemente der Materialflusssimulation auf den Sonderfall der schiffbaulichen Unikatfertigung

innerhalb eines Produktionsnetzwerkes an. Hierbei ist es die Herausforderung, den mit steigender Anzahl von Standorten exponentiell anwachsenden Parameterraum zu beherrschen. Hier versagen sowohl statische Kalkulationen als auch die üblichen Materialflusssimulationen. Das entwickelte Werkzeug strukturiert genau diese Parameter, verknüpft sie logisch und bereitet Planungsentscheidungen vor und optisch auf. Als Benefit kann die Simulationssoftware einen Beitrag zur Meilensteinplanung sowie zur durchlaufzeitoptimierten Verteilung der Produktkomponenten auf die verschiedenen Standorte unter Berücksichtigung verschiedener Baumethodiken bzw. Fertigungsstrategien sowie in letzter Instanz unterschiedlicher Investitionsszenarien leisten. Auch bei der Bestimmung fremd zu vergebender Baugruppen und deren Lieferzeitpunkten kann die Simulation den Planer unterstützen. Darüber hinaus hilft sie dabei, vorherrschende Interessenskonflikte, die häufig zwischen Standorten innerhalb eines Produktionsnetzwerkes existieren, mit objektiven Daten zu unterlegen.

Literatur

- Burnett, G.A.; Medeiros, D.J.; Finke, D.A.; Traband, M.T.: Automating the development of shipyard manufacturing models. In: Mason, S.J.; Hill, R.; Moench, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J.W. (Hrsg.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC), Miami (USA). 2008, S. 1761-1767.
- Dain, O.; Ginsberg, M.; Keenan, E.; Pyle, J.; Smith, T.; Stoneman, A.; Pardoe, I.: Stochastic Shipyard Simulation with SimYard. In: Perrone, L.F.; Wieland, F.P.; Liu, J.; Lawson, B.G.; Nicol, D.M.; Fujimoto, R.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference (WSC), Monterey (USA). 2006, S. 1770-1778.
- Deutscher Reiseverband (DRV) – CLIA Global Report 2014. <https://www.driv.de/fachthemen/schiff/detail/mehr-als-22-millionen-kreuzfahrtpassagiere-weltweit.html>. Letzter Zugriff am 09.07.2017.
- Gurria, A.; Mann C.L.: Escaping the Low-Growth Trap? Effective Fiscal Initiatives, Avoiding Trade Pitfalls. OECD Economic Outlook No. 100, 2016.
- 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 (SVN). 2007, S. 1-11.
- Kulkarni, P.R.: Review of Global Naval Shipbuilding Trends and Lessons for Indian Shipbuilding Industry. Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India 11 (2015) 1, S. 116-132.
- Lanza, G.; Book, J.: Modellierung und Simulation von Wertschöpfungsnetzwerken unter Berücksichtigung realer Entscheidungsstrukturen durch die Verwendung von Software-Agenten. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 389-396.
- Ljubenkov, B.; Dukic, G.; Kuzmanic, M.: Simulation Methods in Shipbuilding Process Design. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 54 (2008) 2, S. 131-139.
- Medeiros, D.J.; Traband, M.; Tribble, A.; Lepro, R.; Fast, K.; Williams, D.: Simulation based design for a shipyard manufacturing process. In: Joines, J.A.; Barton, R.R.; Kang, K.; Fishwick P.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando (USA). 2000, S. 1411-1414 vol. 2.

- Nayabi, K.: Gestaltung und Optimierung von Produktions- und Logistiknetzwerken mit Hilfe von IT-unterstützter Simulation. Conference Paper, Internationale Fachmesse für Distribution, Material- und Informationsfluss (LogiMAT), Stuttgart, 2005.
- RWI/ISL – Containerumschlag-Index. <http://www.rwi-essen.de/containerindex>.
Letzter Zugriff am 09.7.2017.
- 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.; Meyer-König, S.: Simulation Aided Production Planning in Block Assembly, In: Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT), Oegstgeest, 2006, S. 96-102.
- Steinhauer, D.; Wagner, L.: Simulationsgestützte Optimierung in der schiffbaulichen Produktionsplanung. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008, S. 459-467.
- Steinhauer, D.; Hübler, M.; Wagner, L.; Esins, E.; Pester, P.; Friedewald, A.; Wandt, R.: GeneSim - Generisches Daten- und Modellmanagement für die schiffbauliche Produktionssimulation. Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik, Rostock, 2011, S. 7-23.
- Steinhauer, D.; Habenicht, I.; König, M.; Hilfert, T.; Lödding, H.; Friedewald, A.; Sikorra, J.N.; Haux, M.A.; Hübler, M.; Roppelt, A.: Hocheffiziente, digitale Produktionsplanung für Prototypenkompetenz. Schiff & Hafen 4 (2017), S. 32-37.

Simulative Bestimmung des Wirtschaftlichkeitspotenzials von Produktionsstrukturen

Simulative Determination of the Economic Feasibility of Production Structures

Günther Schuh, Jan-Philipp Prote, Melanie Luckert, Christiane Müller,
WZL der RWTH Aachen, Aachen (Germany), g.schuh@wzl.rwth-aachen.de,
j.prote@wzl.rwth-aachen.de, m.luckert@wzl.rwth-aachen.de,
ch.mueller@wzl.rwth-aachen.de

Abstract: In a complex and global market environment, suitable production structures enable companies to work economically and stay competitive. Despite frequent changes in the production structure, these restructuring projects are rarely successful due to e.g. the lack of application of discrete event simulation and the possibility to continuously monitor the performance of given production structures. The approach presented in this paper, addresses the development of a holistic, practical methodology for the simulative determination of the economic feasibility of production structures. Based on an algorithm for cell formation, production structures are automatically simulated and the simulation results are visualized transparently.

1 Einführung

Im globalen Wettbewerb ist Wirtschaftlichkeit weiterhin das dominierende Ziel von Unternehmen (Wiendahl 2014). Bezogen auf die Produktion setzt sich die Wirtschaftlichkeit aus den Dimensionen Logistikleistung (hohe Liefertermintreue und kurze Lieferzeiten) und Logistikkosten (Prozesskosten und Kapitalbindungskosten) zusammen (Lödding 2016). Die wichtigste logistische Leistungsgröße produzierender Unternehmen stellt dabei konstant während der letzten Jahre die Erreichung einer hohen Liefertermintreue dar (Schuh et al. 2013; Mayer et al. 2016). Produzierende Unternehmen stehen zudem vor der Herausforderung, die steigende Marktkomplexität durch personalisierte Produkte und kurze Produktlebenszyklen in ihrer Produktion abbilden zu können (Bauernhansl 2014).

Die Gestaltung der Produktionsstruktur wurde als wichtiger Stellhebel identifiziert, um sowohl die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens zu steigern als auch die geforderte Produktflexibilität zu ermöglichen (Dixit und Gupta 2013; Wildemann 1994). Laut einer Studie haben 59 % der befragten Unternehmen in den letzten fünf

Jahren mindestens einmal und 17 % 16-20 Mal ihre Produktionsstruktur verändert. Das wichtigste Ziel der Strukturänderung war dabei die Kostensenkung (70 %), gefolgt von einer Verkürzung der Durchlaufzeit (65 %) und einer Verbesserung der Termintreue (49 %) (Luckert et al. 2016). Im Kontext des vorliegenden Artikels bezeichnet der Begriff Produktionsstruktur die Organisation der Maschinen eines Standortes in Subsysteme, die entweder als Werkstattfertigung mit ungerichtetem oder als Linienfertigung mit unidirektionalem Materialfluss ausgeprägt sein können.

2 Herausforderungen

Die Herausforderung bei der Wahl der wirtschaftlichsten Produktionsstruktur liegt darin, dass einerseits aufgrund des sich ständig ändernden Produktprogramms von Unternehmen eine kontinuierliche Überprüfung der Wirtschaftlichkeit der vorliegenden Produktionsstruktur und ein Vergleich mit alternativen Strukturen benötigt werden. Andererseits ist aktuell die Gestaltung von Produktionsstrukturen, deren Bewertung und Vergleich mit hohem Aufwand verbunden.

Der hohe Aufwand bei der Gestaltung von Produktionsstrukturen wird durch die hohe Anzahl möglicher Produktionsstrukturen verursacht. Die Anzahl möglicher Produktionsstrukturen, d. h. möglicher Maschinen-Subsystem-Zuordnungen, kann durch die Bell-Zahl beschrieben werden und steigt exponentiell mit der Anzahl Maschinen in der betrachteten Produktion (Harris et al. 2008). Eine Produktion mit 10 Maschinen hat bereits über 10 Millionen mögliche Produktionsstrukturen (Arnold et al. 1999). Eine vollständige Betrachtung aller Strukturen ist daher nicht möglich. Es müssen gezielt die potenziell wirtschaftlichsten erzeugt werden.

Die Bewertung und der Vergleich von Produktionsstrukturen werden entweder analytisch oder mittels einer ereignisdiskreten Simulation vorgenommen. Die analytische Bewertung ist dabei relativ aufwandsarm, weist jedoch auch eine stark begrenzte Abbildungsgenauigkeit auf (Grundig 2015). Die Simulation dagegen erlaubt die bestmögliche Annäherung an die reale Produktion (Cassandras und Lafortune 2008) und wird bereits zur Bewertung von Produktionsstrukturen genutzt (Cassandras und Lafortune 2008; Tako und Robinson 2012; Bangsow 2010). Die Anwendungsbreite in der Praxis ist dabei allerdings eingeschränkt; eine Nutzung findet insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen selten statt (Luckert et al. 2016). Die Ursachen der fehlenden Anwendung von Simulation liegen in den hohen Kosten einer Simulation. Diese werden insbesondere verursacht durch die fehlende Verfügbarkeit schlüsselfertiger Simulationsmodelle, fehlendes Anwendungswissen und einen hohen Zeitbedarf zur Anwendung (McLean und Leong 2001; Hollocks 2003).

3 Stand der Technik

Dem Problem der Gestaltung der potenziell wirtschaftlichsten Produktionsstrukturen, im englischen unter dem Begriff „cell formation“, widmen sich zahlreiche Forscher. Einen Überblick über bestehende, produktionsbasierte Verfahren geben u. a. Papaioannou und Wilson (2010) mit Nennung der Verfahren Clusteranalyse, mathematische Programmierung, Graphpartitionierung, heuristische und metaheuristische Algorithmen und Methoden künstlicher Intelligenz. Die mathematische Programmierung kann aufgrund der NP-Komplexität der Produktionsstrukturierung

nur bei einem unrealistisch kleinen Produktionsumfeld eingesetzt werden und ist daher für die hier vorliegende Zielsetzung nicht geeignet (Papaioannou und Wilson 2010). Ein Beispiel dafür ist in Kia et al. (2013) enthalten, welche ein mathematisches Modell entwickeln und auf ein Beispiel mit vier Produkten und fünf Maschinen anwenden. Das Problem der Heuristiken und Algorithmen liegt in der Zielfunktion, welche mit der Logistikleistung und den Logistikkosten mehrere, teilweise konfliktäre Ziele beinhaltet (Papaioannou und Wilson 2010). Viele Ansätze begrenzen daher die betrachteten Ziele und fokussieren sich z. B. auf die Minimierung der subsystemübergreifenden Materialflüsse (Imran et al. 2014).

Um die Möglichkeit des Simulationseinsatzes von Unternehmen zu erhöhen, wurden die Ansätze der (teil-)automatischen Modellgenerierung entwickelt. Dabei werden Simulationsmodelle aus externen Daten generiert, die über Schnittstellen bereitgestellt werden. Der Datenursprung kann beispielsweise in Enterprise-Resource-Planning-Systemen liegen (Straßburger et al. 2010). Eine Übersicht bestehender Ansätze zur (teil-)automatischen Modellgenerierung geben u. a. Selke (2005) und Straßburger et al. (2010). Bergmann (2013) fokussiert Standards im Datenaustausch als grundlegende Anforderung zur erfolgreichen Umsetzung der automatischen Modellgenerierung. Huang et al. (2011) stellen einen weiteren Ansatz zur datengetriebenen Modellerzeugung vor. Kádár et al. (2010) wenden die automatische Modellgenerierung für die ereignisbasierte Simulation von Produktionssteuerungskonfigurationen an und entwickeln auf dieser Basis ein Entscheidungsunterstützungssystem, welches betriebsbegleitend eingesetzt werden kann. Die Vorteile der automatischen Modellgenerierung liegen in der Reduktion des Aufwands zur Modellerstellung und der Anwendung ohne Simulationsexpertenwissen (Selke 2005).

4 Zielsetzung und Anforderungen an die Lösung

Der Forschungsbedarf des vorliegenden Beitrags ergibt sich aus dem Fehlen einer ganzheitlichen, praxistauglichen Methodik zur simulativen Bewertung des Wirtschaftlichkeitspotenzials von Produktionsstrukturen. Diese Lücke soll mit der präsentierten Methodik geschlossen werden.

Die Praxisanforderungen an diese Methodik ergeben sich aus den genannten Herausforderungen und sind daher eine aufwandsarme Anwendung der Methodik, die Anwendbarkeit für reale Anwendungsfälle und die Bereitstellung einer fundierten Entscheidungsunterstützung. Im Detail bedeutet dies für die Lösung: Verwendung von vorhandenen Daten, automatische Bildung des Simulationsmodells, Integration der potenziell wirtschaftlichsten Strukturen, Integration aller relevanten Zielgrößen, Anwendung der Methodik ohne Expertenwissen und geeignete Visualisierung der Ergebnisse.

Dass fehlende, nutzerfreundliche Software zu einer zu geringen Frequenz der Eignungsüberprüfung führt, haben bereits Jonsson und Mattson am Beispiel der Planvariablen für Materialfluss nachgewiesen (Jonsson und Mattsson 2006). Die hier vorgestellte und in eine Software überführte Methodik soll dieses Problem für die Überprüfung der Struktureignung beheben und kontinuierliche Überwachung ermöglichen.

5 Lösungsansatz

Die entwickelte Methodik zur simulativen Bewertung von Produktionsstrukturen ist ein mehrstufiges Vorgehen. Die Architektur und Elemente der Methodik sind in Abbildung 1 dargestellt.

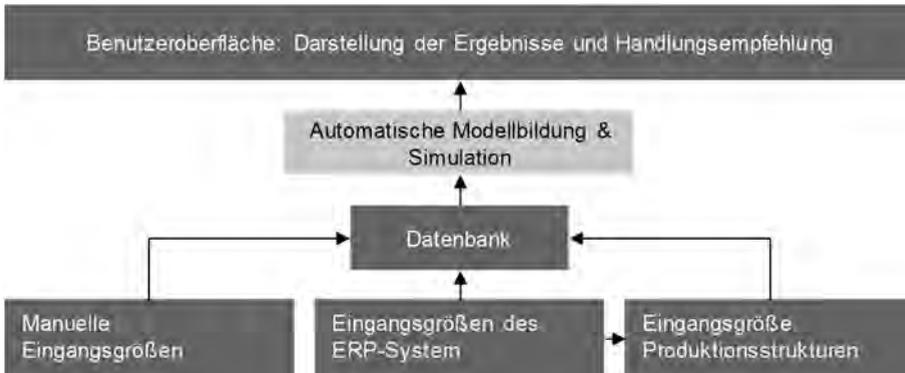


Abbildung 1: Architektur und Elemente der Methodik

Die Methodik basiert auf der Annahme, dass die Erzeugung von Produktionsstrukturen getrennt von der Bewertung zu erfolgen hat. Dadurch kann die Gestaltung von Produktionsstrukturen auf Basis einer Zielgröße erfolgen. Bei der Bewertung durch Simulation können anschließend alle relevanten Zielgrößen aufgenommen werden. In den folgenden Unterkapiteln werden die Elemente der Methodik im Detail erläutert.

5.1 Aufbau der Datenbank für die Simulationsexperimente

Die Simulation alternativer Produktionsstrukturen benötigt drei Eingabeformate: Eingangsgrößen aus dem ERP-System, manuelle Eingangsgrößen und Produktionsstrukturen, welche in eine gemeinsame Datenbank überführt werden.

5.1.1 Eingangsgrößen aus dem ERP-System

Die Eingangsgrößen aus dem ERP-System werden in drei standardisierte Tabellen überführt und beinhalten die in Tabelle 1 bis 3 dargestellten Daten.

Tabelle 1: Eingangsgröße ERP-System: Arbeitspläne (Auszug)

Material	Vorgang	Maschine	Hauptzeit	Rüstzeit
P131530	10	M1464	3:09:00.0000	30:00.0000
P131530	20	M1465	3:09:00.0000	30:00.0000
P131530	30	M5401	1:25:40.8000	45:00.0000
P131530	40	M5753	2:14:49.2000	30:00.0000

Tabelle 2: Einganggröße ERP-System: Fertigungsaufträge (Auszug)

Auftrag	Materialnr.	Losgröße	Starttermin	Bedarfstermin
A527	P131530	1	20.01.2018	02.02.2018
A783	P157460	5	11.03.2018	18.03.2018
A1202	P715862	2	26.02.2018	03.03.2018

Tabelle 3: Einganggröße ERP-System: Ressourcen (Auszug)

Maschine	Maschinen- stundensatz	Personal- bindungs- faktor	Schichten/ Tag	Stunden/ Schicht	Tage/ Woche
M1464	86,00 €/h	0,25	3	8	6
M1465	80,00 €/h	0,25	3	8	6
M5401	85,00 €/h	0,7	3	8	6

Zusammenfassend handelt es sich dabei um das geplante Produktionsprogramm mit produktspezifischen Stückzahlen, Arbeitsplänen und vorhandenen Ressourcen.

5.1.2 Manuelle Eingangsrößen

Da nicht alle benötigten Daten in den ERP-Systemen vorhanden sind, werden als manuelle Eingangsrößen die folgenden Daten ergänzt: Transportkosten und -zeiten innerhalb von Werkstätten, Transportkosten und -zeiten innerhalb von Linien und Transportkosten und -zeiten bei Segmentwechseln. Die manuellen Eingangsrößen dienen damit der Modellierung der Unterschiede zwischen Werkstätten und Linien.

5.1.3 Eingangsröße Produktionsstrukturen

Auf Basis der Eingangsrößen aus dem ERP-System wird ein Clusteralgorithmus angewendet, welcher eine manuell vorgebbare Anzahl von Produktionsstrukturen erzeugt. Dabei wird, ausgehend von den längsten, möglichen Linien, sukzessive eine Aufspaltung der Linien und Integration der separierten Maschinen in Werkstätten vorgenommen. Die Zielfunktion des Clusteralgorithmus setzt sich aus der mittleren Segmentgröße und der Anzahl der Linien zusammen, da diese beiden Kriterien die angestrebte Verbesserung der logistischen Zielgrößen beeinflussen.

Tabelle 4: Eingangsröße Produktionsstrukturen (Auszug)

Struktur-ID	M1464	M1465	M5401	...
1	30	30	1	...
2	20	20	20	...

Durch die sukzessive Aufspaltung von Linien wird sichergestellt, dass auch bei einer geringen Anzahl betrachteter Strukturen die potenziell erfolgreichsten Strukturen

enthalten sind. Eine ausführliche Beschreibung des Clusteralgorithmus ist in Reuter et al. (2016) enthalten. Das Ergebnis des Clusteralgorithmus stellt eine Matrix analog Tabelle 4 dar, in welcher jede Struktur-ID eine Produktionsstruktur darstellt. Dabei wird für jede Maschine definiert, zu welchem Subsystem sie gehört, z. B. gehören bei Strukturkonzept 2 alle gezeigten Maschinen zu Subsystem 20.

5.2 Automatische Modellbildung und Durchführung der Simulationsexperimente

Das Simulationsmodell wird automatisch durch eine Kombination aus parametrischer und strukturbasierter Modellierung in Tecnomatix Plant Simulation aufgebaut. Diese Software wird gewählt, da sie die Möglichkeit bietet, standardisierte Objektbibliotheken und Methoden individuell durch die enthaltene Programmiersprache SimTalk anzupassen und zu erweitern.

Für den Aufbau des Simulationsmodells werden die beschriebenen Eingangsgrößen importiert und in standardisierte Tabellen des Simulationsmodells überführt. Der Experimentverwalter greift auf die Inputtabelle *Produktionsstrukturen* (Tab. 4) zu und wird durch eine Methode aktiviert, die darin enthaltenen Strukturen vollständig zu simulieren. Die Simulation kann um die Untersuchung von Einflüssen der Produktionssteuerungskonfiguration erweitert werden, indem auf der Benutzeroberfläche alternative Reihenfolgeregeln gewählt und für jede Struktur simuliert werden.

Je Simulationslauf, d. h. je Struktur, werden die logistische Leistungsfähigkeit Z sowie die normierten Gesamtkosten K bestimmt, zur weiteren Verwendung exportiert und zu einem Potenzialwert P gleichgewichtet aggregiert. Die normierten Kosten bestimmen sich gemäß Gleichung 1 (mit k_O als normierte Organisationskosten, k_P als normierte Personalkosten, k_L als normierte Logistikkosten, k_M als normierte Maschinenkosten):

$$K = \frac{k_O}{4} + \frac{k_P}{4} + \frac{k_L}{4} + \frac{k_M}{4} \quad (1)$$

Die einzelnen Kostenarten werden auf das niedrigste Ergebnis der jeweiligen Kostenart normiert. Da sich die Größenordnung der einzelnen Kostenarten teilweise sehr stark unterscheidet, kann durch eine Normierung gewährleistet werden, dass jede Kostenart in gleichem Maße berücksichtigt wird.

Die logistische Leistungsfähigkeit Z bestimmt sich gemäß Gleichung 2 (mit g_n als Gewichtungsfaktor für die Zielgröße n , z_{DLZ} als normierte Durchlaufzeit, z_B als normierter Umlaufbestand, z_A als normierte Auslastung, z_{TT} als normierte Termintreue):

$$Z = g_{DLZ} \times z_{DLZ} + g_B \times z_B + g_A \times z_A + g_{TT} \times z_{TT} \quad (2)$$

Die Durchlaufzeit und der Umlaufbestand werden dabei auf den kleinsten Wert, die Termintreue und die Auslastung auf den größten Wert normiert, um das jeweils angestrebte Ziel abzubilden. Neben der Bewertung der Strukturen wird ein Indikator für den Strukturiertheitsgrad der Konzepte – der Liniengrad – ermittelt, um

anschließend eine übersichtliche Darstellung für den Benutzer zu ermöglichen. Der Liniengrad wird als das Verhältnis von in Linien durchgeführten Vorgängen zu allen Arbeitsvorgängen aufgrund der positiven Korrelation mit dem Potenzialwert definiert.

Für den Simulationsablauf gelten die folgenden Rahmenbedingungen:

- Es werden je Struktur die durch Tabelle 2 vorgegebenen Fertigungsaufträge simuliert. Dadurch sind die zu fertigenden Produkte nach Menge, Arbeitsplan und Starttermin der Produktion vorgegeben.
- Die vorhandenen Ressourcen und die Ressourcenverfügbarkeit werden nach Tabelle 3 konfiguriert. Maschinenausfälle und weitere Störungen werden nicht separat simuliert, sondern in die Maschinenverfügbarkeit integriert.
- Das System *Maschine* besteht aus drei Puffern: Nach Durchführung des Transports treffen Aufträge zuerst im Eingangspuffer vor der Maschine ein. Ab diesem Moment stehen sie zur Bearbeitung zur Verfügung und werden in eine Sortierliste eingetragen, welche entsprechend der eingestellten Reihenfolgeregel darüber entscheidet, wann ein Auftrag auf der Maschine bearbeitet wird. Handelt es sich um einen Auftrag mit mehr als einem Stück, so findet in dem nachfolgenden Maschinenpuffer die Vereinzelung des Auftrags statt. Der Auftrag wird gemäß seiner Priorität auf der Maschine bearbeitet und anschließend in den Ausgangspuffer verlagert. Im Ausgangspuffer wird bei Bedarf der Auftrag wieder gesammelt und für die vorgegebene Transportzeit gelagert, bevor er an den Eingangspuffer der nachfolgenden Maschine übergeben wird.
- Für die Bestimmung des Personalbedarfs wird jeder Ressource ein Personalbindungsfaktor zugewiesen. Personalbindungsfaktoren innerhalb von Subsystemen werden addiert, womit eine Mehrmaschinenbedienung simuliert wird. So wird z. B. zwei Maschinen mit Personalbindungsfaktoren von 0,4 und 0,6 innerhalb eines Subsystems nur ein Mitarbeiter zugeordnet.
- Der Transport innerhalb von Linien findet in Form eines One-piece-flows, innerhalb von Werkstätten und zwischen Subsystemen auftragsweise statt. Zur Bestimmung der anzuwendenden Transportzeiten wird zu Simulationsbeginn geprüft, welche Subsysteme Linien und welche Werkstätten darstellen. Linien sind hierbei dargestellt als Subsysteme mit unidirektionalem Materialfluss und jeweils einem Ein- und Ausgang. Alle Subsysteme, die dieser Definition nicht entsprechen, stellen Werkstätten dar.

Zur Validierung des Simulationsmodells wird die aktuelle Produktionsstruktur in die Simulation integriert. Anhand des Vergleichs der realen Leistungs- und Kostenwerte mit den Simulationsergebnissen kann die Eignung und Anwendbarkeit des Simulationsmodells überprüft werden.

5.3 Ausgestaltung der Benutzeroberfläche

Die Ergebnisse der Simulation, der Potenzialwert und der Liniengrad, werden anschließend auf der Oberfläche dem Nutzer zur Verfügung gestellt. In Abbildung 2 wird das Ergebnis für die Produktion eines Unternehmens aus dem Maschinen- und Anlagenbau dargestellt, wofür 10.000 Strukturen simuliert wurden.

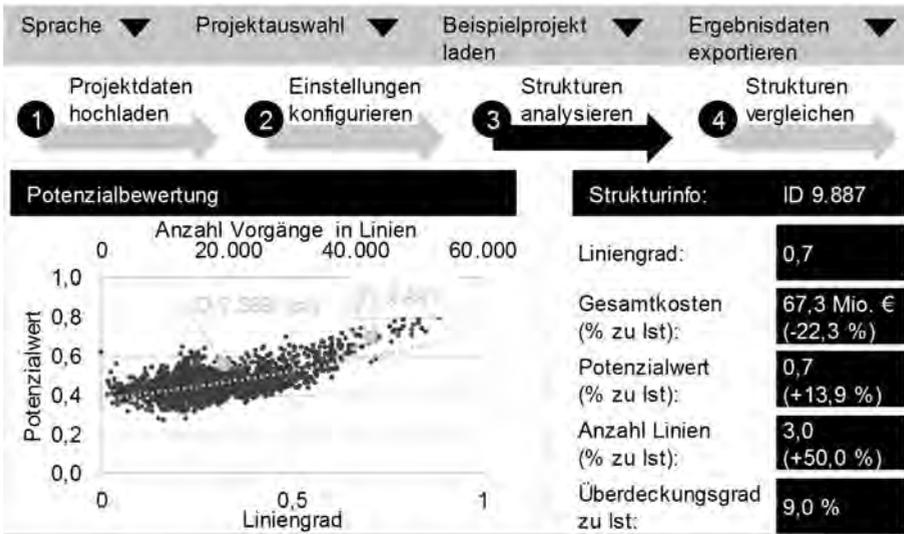


Abbildung 2: Darstellung der Simulationsergebnisse in Form einer Punkteschar

Jeder Punkt stellt dabei eine Struktur und somit ein Simulationsexperiment dar. Im Beispiel ist der Potenzialwert der vorhandenen Struktur mit der ID 2.389 gegenüber einer alternativen, besseren Struktur mit der ID 9.887 aufgetragen. Strukturen können, wie in Abbildung 3 dargestellt, zusätzlich visuell anhand ihres Aufbaus verglichen werden.

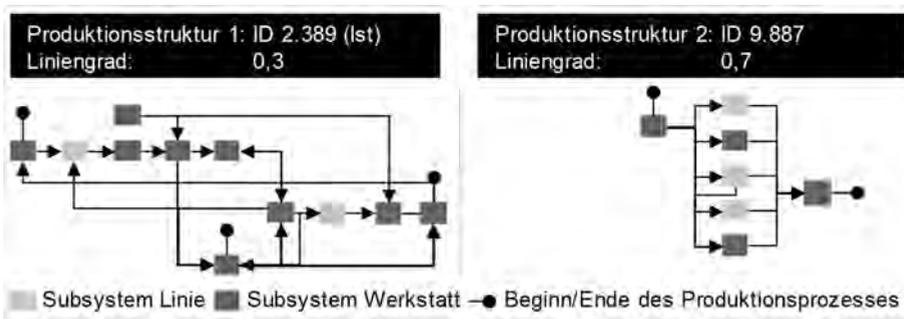


Abbildung 3: Vergleich von zwei Produktionsstrukturen

Die gezeigten Ergebnissichten der Software werden komplettiert durch Ansichten der Verläufe einzelner Kennzahlen des Potenzialwerts. Beispielsweise können die Verläufe der vier logistischen Zielgrößen oder die Verläufe aller Kostenkategorien dargestellt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag präsentierte Methodik ermöglicht eine kontinuierliche Bewertung der Wirtschaftlichkeit der vorhandenen Produktionsstruktur und die

automatische Simulation alternativer Produktionsstrukturen. Auf Basis der beschriebenen Methodik können Unternehmen ohne Expertenwissen im Bereich der ereignisdiskreten Simulation hochwertige Ergebnisse erhalten. Liegt ein hohes Wirtschaftlichkeitspotenzial durch Veränderung der Produktionsstruktur vor, so werden die Entscheider darüber transparent und schnell informiert. Durch die Integration der für Entscheider relevanten Zielgrößen werden objektive Entscheidungen ermöglicht. Die leicht verständliche Visualisierung ermöglicht eine Anwendung ohne lange Einarbeitungsphase. Die vorgestellte Methodik kann damit zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen beitragen, indem sie bei der Wahl einer geeigneten Produktionsstruktur unterstützt und eine kontinuierliche Überwachung der Struktureignung ermöglicht. Die Entscheidung über den Beginn von zeit- und kostenintensiven Restrukturierungsprojekten kann damit in Abhängigkeit des vorliegenden Potenzials zielorientiert getroffen werden.

Förderhinweis

Der vorgestellte Ansatz wird vom Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen im Rahmen der Exzellenzcluster Initiative "Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer" (gefördert von der DFG) entwickelt.

Literatur

- Arnold, J.; Fischer, T.; Fröhner, A.: Ein genetischer Algorithmus zur simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungssystemen. KI-Methoden in der simulationsbasierten Optimierung (1999), S. 31–48.
- Bangsow, S.: Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk: Usage and Programming with Examples and Solutions. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.
- Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution - Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014, S. 5–35.
- Bergmann, S.: Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen. Ilmenau: Univ.-Verl. Ilmenau 2013.
- Cassandras, C.G.; Lafortune, S.: Introduction to discrete event systems. New York: Springer Science+Business Media 2008.
- Dixit, A.R.; Gupta, M.: Current status, enablers & barriers of implementing cellular manufacturing system in Indian industries. Advances in Manufacturing 1 (2013) 4, S. 346–356.
- Grundig, C.-G.: Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. München: Carl Hanser 2015.
- Harris, J.M.; Hirst, J.L.; Mossinghoff, M.J.: Combinatorics and graph theory. New York: Springer 2008.
- Hollocks, B.W.: Guidelines for effective simulation in manufacturing management and control. In: Monostori, L.; Kádár, B.; Morel, G. (Hrsg.): Intelligent manufacturing systems 2003. Oxford: Pergamon for the International Federation of Automatic Control by Pergamon c/o Elsevier 2003, S. 127-132.
- Huang, Y.; Seck, M.D.; Verbraeck, A.: From Data to Simulation Models: Component-based Model Generation with a data-driven Approach. In: Jain, S.; Creasey, R. R.;

- Himmelspach, J.; White, K. P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (2011), Phoenix: IEEE, S. 3724–3734.
- Imran, M.; Iqbal, N.; Jahanzaib, M.: Minimization of intercellular movements in cellular manufacturing system using genetic algorithm. *Technical Journal, University of Engineering and Technology Taxila* 19 (2014) 2, S. 16–22.
- Jonsson, P.; Mattsson, S.: A longitudinal study of material planning applications in manufacturing companies. *International Journal of Operations & Production Management* 26 (2006) 9, S. 971–995.
- Kádár, B.; Lengyel, A.; Monostori, L.; Suginishi, Y.; Pfeiffer, A.; Nonaka, Y.: Enhanced control of complex production structures by tight coupling of the digital and the physical worlds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 437–440.
- Kia, R.; Shirazi, H.; Javadian, N.; Tavakkoli-Moghaddam, R.: A multi-objective model for designing a group layout of a dynamic cellular manufacturing system. *Journal of Industrial Engineering International* 9 (2013) 1, S. 8.
- Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Berlin Heidelberg: Springer 2016.
- Luckert, M.; Frankenbach, F.; Reuter, C.; Brambring, F.: *Strukturierung der Produktion: Ergebnisse einer Studie des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag 2016.
- Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes, P.; Nyhuis, P.: *Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen: Studienergebnisse*. Garbsen: PHZ 2016.
- McLean, C.; Leong, S.: The Role of Simulation in Strategic Manufacturing. *Proceedings of the 2001 International working Conference on Strategic Manufacturing* (2001), S. 1-12
- Papioannou, G.; Wilson, J.M.: The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European Journal of Operational Research* 206 (2010) 3, S. 509–521.
- Reuter, C.; Prote, J.P.; Gützlaff, A.; Luckert, M.: Generation of Cellular Manufacturing Variants for the Potential Determination of Production Structures. *Advanced Materials Research* 1140 (2016), S. 489–496.
- Schuh, G.; Stich, V.; Brambring, F.; Hauptvogel, A.; Hempel, T.; Luckert, M.; Hering, N.; Kropp, S.; Maasem, C.; Meißner, J.; Reschke, J.; Schnittler, V.: *Produktion am Standort Deutschland: Ergebnisse der Untersuchung 2013*. Aachen 2013.
- Selke, C.: *Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodell-generierung*. München: Utz 2005.
- Straßburger, S.; Bergmann, S.; Müller-Sommer, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In: Zülch, G. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 37-44.
- Tako, A.A.; Robinson, S.: The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems* 52 (2012) 4, S. 802–815.
- Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser 2014.
- Wildemann, H.: *Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungs-segmentierung*. München: TCW-Transfer-Centrum GmbH 1994.

Transformation of Real-time Reporting Event Data to Long-term Simulation Models

Transformation von Echtzeit-Reporting Event Datenelementen in Langfrist-Simulationsmodelle

Mike Gißrau, Torsten Gereke, SYSTEMA, Dresden (Germany),
mike.gissrau@systemagmbh.de, torsten.gereke@systemagmbh.de

Abstract: Data collection and aggregation is one of the master challenges in creating valuable simulation models. The complexity of this task still increases in typical inhomogeneous and historically grown IT infrastructures even in older wafer fabs. This paper describes an advanced way to use an online and real-time reporting source to generate all necessary data for a long-term simulation model. Within the paper, a short introduction to the ability of real-time data aggregation, the data pre-processing and simulation model transformation and generation is given. The main objective is to offer a new common interface where different simulation solutions can access the required simulation data without additional integration effort.

1 Introduction

Today simulation is one of the still growing techniques to identify and analyze complex production environments. Banks (2001) proposed simulation to be “consistently one of the top three methodologies used by industrial engineers, management scientists, and operations research”.

In semiconductor environment, simulation becomes more and more a major element on short-term and long-term planning and improvement of wafer fabs. Typical fields of investigation are production planning, ramp-up scenarios or the improvement of dispatching and scheduling approaches (Andersson et al. 2008). Even in Europe, complexity of production processes is continuously increasing. At the same time, customer specific variations of products are transforming classical mass production operations into sensitive production networks with a wide range of different production classes. Statistical methods for production planning become more and more imprecise and unstable.

In general, the data acquisition, verification and validation of simulation models is hard work. The complexity of these tasks still increase in typical inhomogeneous and historically grown IT infrastructures even in older wafer fabs. Banks (2008) underlined this problem by the following statement:

“If there is no data available, not even estimates, simulation is not advisable”

One of the major problems of today’s simulation projects is the acquisition of data for a valid and valuable simulation experiment and results. Typical elements are product flows, processing times or equipment dedications. Often, this information is distributed at different systems at typical semiconductor manufacturing sites. Besides the manufacturing execution system, also enterprise resource planning tools or tools for recipe management, equipment maintenance planning and others are in place. Sometimes, the information is not accessible.

In this paper, we want to propose a new consistent way to generate important master data elements from manufacturing events within an event-oriented data aggregation real-time reporting environment to create valuable master data for long-term simulation experiments and analysis. Today typical approaches request all necessary data from a database or defined file format producing a lot of load and validation effort (Son and Wysk 2001). An efficient data collection and generation approach is also mentioned as one of the challenges in simulation of complex manufacturing systems (Noack and Rose 2008).

2 Long-term vs. Short-term Simulation Models

In today’s facility environments, two general model types (and all in-between) are known and mentioned by Noack (2012) and Gißrau (2013).

Within long-term models, the production process under investigation is modeled with more general assumptions to generate a valuable output for questions regarding capacity planning or long-term resource allocation. This type of model is widely used even in semiconductor environment. Typical, many statistical distributions, e.g. for equipment availability or operator availability are used. For short-term prediction, these models are often not applicable due to their lower level of granularity. In this case, many more data like planned maintenance schedules, the operator work schedule and other detailed data is necessary. Without these data, the prediction is often not sufficient to fulfill typical use cases like work-in-process (WIP) forecast or estimation of flow factors.

In this paper, we mainly address the long-term simulation model type as a first step of our investigations. We will move to the real-time forecast later in our research program.

3 Real-time Data Aggregation via Basic Manufacturing Events

In this section, we give a rough overview about the motivation and the idea of real-time data aggregation via basic manufacturing events.

The real-time aggregation approach is motivated by the relationships between the logical descriptions of objects of the real-world system like a manufacturing system and the real-time information system. For example, a specific movement of a part of a machine may correspond to the engineering concept “process start”. Another movement or event may correspond to a logistical concept called “cycle time”. Such concepts may be used in different kinds of systems (Manufacturing Execution

Systems, Enterprise Resource Planning, etc.). However, all these different kinds of systems could theoretically share the same basic ontology.

The problem domain is to be described as the availability of information (in a most general logical, qualitative and quantitative sense) in order to monitor, supervise, and qualify any kind of industrial/business/financial process, to steer, control, drive and optimize such processes. Assuming different objects or processes (like business processes, financial processes, engineering processes), which are characterized through specific and well-defined figures. Typically, such figures are given as performance indicators, engineering measurements (for example: physical measurements (within semiconductor industry termed inline-data), functional measurements (within semiconductor industry termed test-data), derived measures (example from the semiconductor industry: yield)), or logical associations/ attributions in the general and abstract case.

We have conducted analysis of the mathematical structure describing how information is derived from these scenarios. This study has concluded that any corresponding system model in all the different domains and applications must incorporate the structure of the same basic system model. That is, because of the compositional characteristics, any parameter or data component, which describes the behavior of subsystems on the lowest level of granularity, can be grouped and aggregated with corresponding parameters using historical records, and within the mathematical concept of linear information spaces. The system model preserves the linearity of the overall model, and defines the corresponding linear relations of the historical records. It can be conceptualized as a nondeterministic system according Lee and Seshia (2011).

A fundamental premise of the newly developed methodology (see Fig. 1) is that all incoming data elements or events are immediately captured and transformed into components of information. For example, out of the event “production lot process step terminated”, will result in ‘real-time’ calculation of the information component, which represents the proportionate partial data value for the desired characterization of the production process (kinds of performance indicator, or any other desired aggregation).

Each event can contain multi-dimensional additional context values like product name or current operation. In addition, this information is part of the information components.

This approach is practicable, since the corresponding information is relatively small and is being processed as soon as it is available. Such minimized computational effort is not possible within common solutions even for approaches utilizing small-scale aggregation strategies (i.e. data to be aggregated is split into small batches, which fit in memory).

For more information to the topic, we refer to Luhn et al. (2014, 2015a, 2015b, 2016).

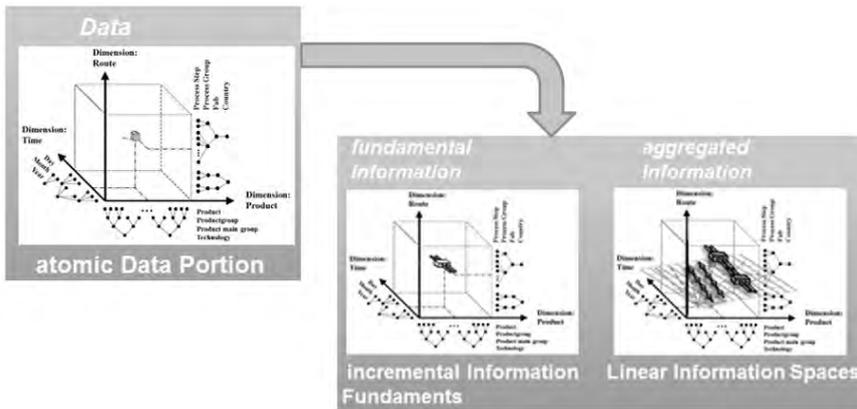


Figure 1: Schematic representation of the new methodology: any Fab event (atomic data portion) gets transformed immediately into incremental Information Fundamentals

4 Master Data Transformation Algorithms

In this section, two different examples for master data generation algorithms from the basic manufacturing events are explained in detail. Of course, several more algorithms are used in order to produce the full set of required data for a simulation model.

4.1 Example 1 – Product Flow

One of the most important elements at a manufacturing model is the description of the product flow of each production entity, e.g. the lot. Besides the right order of operations, also the corresponding production resources and their processing time statistics is necessary. Also possible rework information should be taken into account. Each production entity, also of the same product or technology node, can change its production flow due to different events like changing flow specifications, rework or context changes over time. The proposed algorithm takes the individual flow of each lot under defined context information like product name to form a common flow for each entity of these classes. Figure 2 illustrates the problem by visualizing the summary operation flow of a couple of different lots of the same product from real fab data. The black line marks the reference flow (also called Golden Flow), which is calculated by the different lot flow occurrences.



Figure 2: Exemplified visualization of different lot routes of the same product

To find the right combination of steps for the mass of entities, we used an adapted diff algorithm described by Hunt and McIlroy (1976) to update the flow information by each incoming lot event. It bases on the longest common subsequence (LCS) problem

where the objective is to find the longest subsequence common to all sequences of a given set. In this case, the operational information of two production entities are compared. Each operation element O is assigned a weight W describing the frequency a production entity passes this operation in past. Newer occurrences of an operation gets a higher weight than older ones to allow a fast adaption to changes at the flow, e.g. in case of a change of a defined route in a product flow. At each comparison, the weights are calculated as follows:

- Equal elements: $W_{New} = W_{Old} + S_L$
- New element: $W_{New} = S_L$
- Removed element: $W_{New} = W_{Old} - S_L$

The parameter S_L describes the current number of sub-elements (e.g. wafer) of the production entity. With the usage of the weights, it is possible to remove unwanted influences like rework or special operation flows of production entities. Figure 3 illustrates one example, where Lot 2 executed two operations in past, whereas the current production flow has three operations stored. For operation Y, the new weight is reduced in order to reduce the importance of this step.

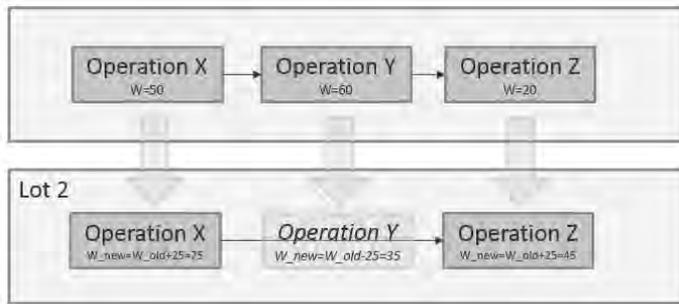


Figure 3: Example of operation weight recalculation

With the calculated weights, it is possible to generate a general flow of operations for different contexts of the production entities, like the product name.

The algorithm is tested with different industrial and synthetic data sets. The synthetic data sets contain of different simulation experiments with a complex semiconductor facility model (see Tab. 1). Within the simulator experiments, different rework rates are simulated to generate variable lot routes within the same product. The rework rates range between 10 % and 50 %. Our experiments shows a valuable output until a rework rate of 30 %. Above this level, the calculated workflows are not stable and usable. At our experiments, the calculated deviation D of the calculated flows to the references is defined by

$$D = \frac{N_{Diff}}{N} \quad (1)$$

where N is the total number of operations and N_{Diff} the number of operations which are not calculated in the right way.

Table 1: Example of complex simulation parameters

Domain	Property	Value
Equipment	Count	189
	Setup	Yes
	Batch	Yes
Products	Count	9
	Raw Process Time	273 h-441 h
	Process Steps	234-355
Setup	Run Length	360 d
	Warm Up	90 d

Some results are illustrated in Figure 4, which shows an example report of the resulting calculation of the product flow.

**Figure 4:** Example analysis of operation flow deviation per lot

In general, the algorithm performs within an average error rate of lower than 5 % in comparison to the reference flow until a reasonable non-standard-flow rate of about 30 %. This behavior could also be investigated by our real fab data experiments from typical semiconductor foundries. With this algorithm, it is now possible to generate the product flows and tool dedications without request the corresponding master data from the warehouse of the customer.

4.2 Example 2 – General Production Control Information

In today's manufacturing environments, several different production control techniques like Dispatching or Scheduling are quite common in daily business (Gißrau 2013). In reality, a wide range of different simple to complex heuristics and algorithms are used to support the manufacturing performance optimization.

Bringing this data and information to a simulation model is very difficult (Noack 2012). Besides the technical problems of how to transform such an algorithm into the simulation language, often also key aspects are not known. Some of the information is stored only in the head of the operating personnel. For simulation purposes, it is quite important to know the main production schedule aspects per equipment.

As a first step, we decided to implement a simplified view on dispatching strategies per equipment by using the available data of the real-time reporting environment without having any access to the scheduling and dispatching systems of the factory. The basic idea is to identify lot groups according to their attributes and contextual information, and then identify the sorting criteria per group. In the most manufacturing environments, we see a group based prioritization and sorting. For this, additional statistics per lot and equipment are gathered and aggregated while the basic manufacturing events comes in. One main idea is to collect the number of preceding processing operations – the lot has to wait on an equipment until the process of the lot itself starts. This idea is transformed in different statistical values describing the weight calculation in different ways. One output is the simple dispatching weight $W_{Equipment}$ that describes the absolute number of preceding processing operations until the lot is produced. Figure 5 illustrates the general idea with a simple example.

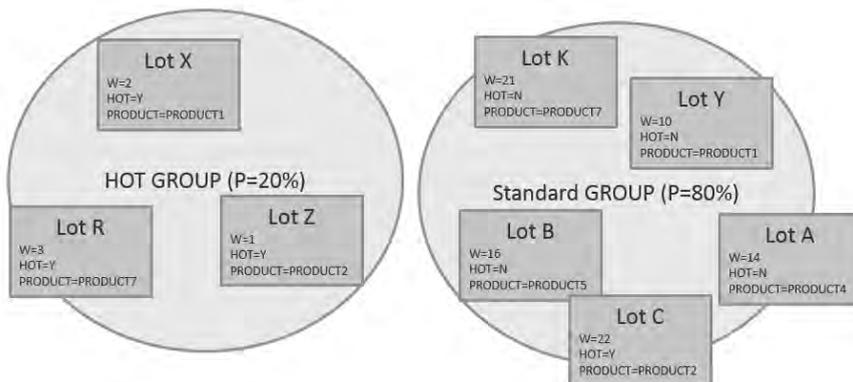


Figure 5: Example for dispatch group classification

We suppose several different lots with two attributes, the hot flag and the product name. Furthermore, this example is addressed to one defined equipment. When the different lots comes to the equipment, for each processing of one lot, the waiting lots weight is increased by one. After a while, the lots have the weights illustrated in the figure. Now it is possible to classify the different lots into several groups via grouping over the weights. Lots with a very low weight are classified in one group (in the example the HOT group), whereas the rest of the lots are classified in another group. In addition, each group can be assigned the amount of all lots passing over time, e.g. 20 % for the HOT group.

The grouping is done with classical statistical methods of clustering. Within the group, it is tried to find out the right sorting criteria (according to available lot attributes), otherwise FIFO is supposed. Several experiments are executed to verify and validate

the supposed algorithm. Figure 6 illustrates experiments with a complex semiconductor model with different dispatching policies and static priorities. Besides the FIFO policy, the static prioritization via three groups and a mixed experiment of both are illustrated.

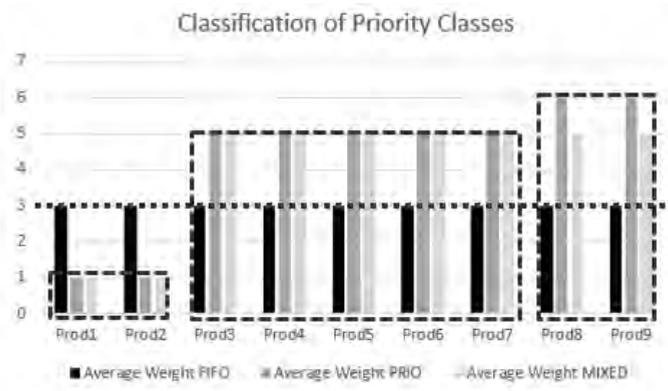


Figure 6: Experimental output with a complex semiconductor simulation model

Figure 7 shows the grouping for a real world example, where six basic main dispatching groups are identified.

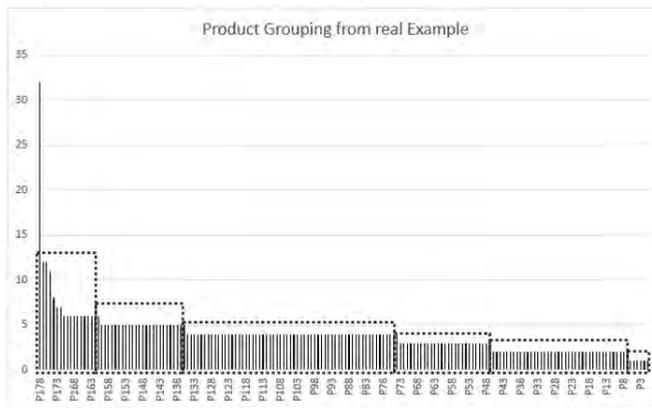


Figure 7: Product grouping for one equipment with real-world data

With this information, it is possible to setup the simulation model with a generic and generalized view on the production control techniques applied in a manufacturing area. Our experiments show a very sophisticated result in detection of the right lot groups and their internal sorting criteria like due date.

5 Simulation Model Generation Workflow

With the exemplified algorithms, it is possible to offer a wide range of different master data required for simulation purposes. Figure 8 illustrates the general workflow.

The start is the empty simulation model, where all necessary objects and its logic is predefined in the simulation environment. This includes the logic of the object flow and its states and behavior. After/during collection of the event data, the real-time reporting environment offers a wide range of different master data sources, which can be accessed by the simulation system in real-time. The simulation environment imports the master data and is able to generate the simulation model. To illustrate this, the figure above shows a generated model without tool layout information from a complex semiconductor simulation environment. The next step is to validate and verify the generated simulation model. The real-time reporting environment also supports this by offering a historical view on the data and allows the system to initialize with a historical set of data (e.g. product distributions, tool down behavior, etc.).

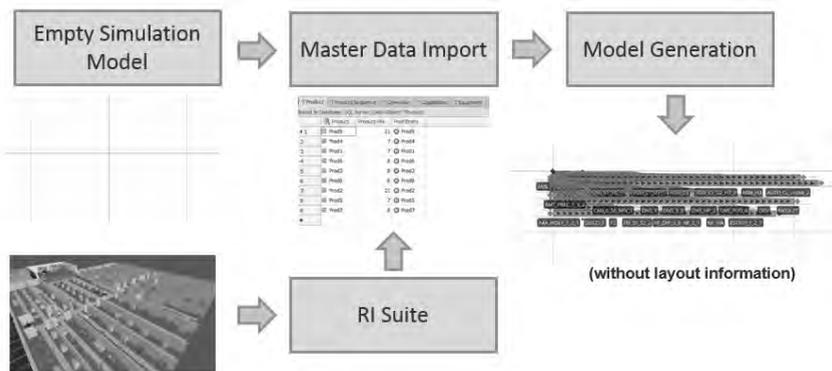


Figure 8: General workflow of model generation

6 Conclusion and Outlook

Within this paper, we describe a possible way to generate simulation model data from an event-driven approach rather than collect all necessary data from different customer sub systems. The main idea is to reuse the event driven data aggregation approach of the real time reporting to generate a sufficient level of master data for the generation of simulation models. The results show valuable outcome in the data conformity and speed. The master data is immediately available after request so that also future online simulation approaches can be supported. Using manufacturing events rather than explicit data calls reduces the complexity of the data calls for model generation, but needs also a sufficient level of availability of the events and its contextual data. The next step within this project is the development of a common interface for a wide range of different simulation systems as well as the support of offline and online simulation approaches. Within this work, future demands of data delivery and aggregation can be realized in real-time, which is one of the key aspects to meet industrial requirements for the digital transformation of manufacturing.

References

- Andersson, M.; Ng, A.; Grimm, H.: Simulation optimization for industrial scheduling using hybrid genetic representation. In: Mason S.J.; Hill, R.R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; and Fowler, J.W. (eds.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008, pp. 2004-2011.
- Banks, J.: Discrete event system simulation. 3rd ed., Prentice Hall, 2001.
- Banks, J.: Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- Gißrau, M.: Development and Introduction of Semiconductor Production Control Enhancements for Customer Oriented Manufacturing. PhD Thesis, Universität der Bundeswehr München, 2013.
- Hunt, J.; McIlroy, M.D.: An Algorithm for Differential File Comparison (PDF). Computing Science Technical Report, Bell Laboratories. June 1976.
- Lee, E.A.; Seshia, S.A.: Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach. LeeSeshia.org 2011.
- Luhn, G.; Ertelt, M.; Zinner, M.: Real-Time Information Systems and Methodology based on Continuous Homomorphic Processing in Linear Information Spaces; patent application pending, placed as US Provisional PA, 7.3.2014.
- Luhn, G.; Bartl, K.: Real-Time Information System as key enabler for “Industry 4.0” inspired Semiconductor Manufacturing – Turning Data Into Fundamental Information. Proceedings of the 15th European Advanced Process Control and Manufacturing Conference, Freising (Germany) 2015a.
- Luhn, G.; Bartl, K.; Habich, D.: Real-Time Information Base as key enabler for Manufacturing Intelligence and Industrie 4.0 – Building the bridge between “real” Real-time Exploitation and Big Data via mathematically grounded Information Fundamentals. Proceedings of the 2015 ASMC, Saratoga Springs NY (USA), 2015b.
- Luhn, G.; Orbanz, J.: “Deep” Production Complexity Management. Real-Time Manufacturing in Fractal Dimensions. Proceedings of the 16th European Advanced Process Control and Manufacturing Conference, Reutlingen (Germany), 2016.
- 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.; Jefferson, T.; Fowler, J.W. (eds.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008, pp. 1989-1994.
- Noack, D.: Towards Realization of a high-fidelity simulation model for short-term horizon forecasting in wafer fabrication facilities. In: Johansson, B.; Jain, S.; Montoya-Torres, J.; Hagan, J.; Yücesan, E. (eds.): Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010. pp. 2563-2574.
- Noack, D.: Online Simulation in Semiconductor Manufacturing. PhD Thesis. Universität der Bundeswehr München, 2012.
- Son, Y.; Wysk, R.: Automatic simulation model generation for simulation-based, real-time shop floor control. Journal Computers in Industry 45 (2001) 3, pp. 291-308.
- Wand, Y.; Weber, R.: Toward a theory of the deep structure of information systems. Information Systems Journal 5 (1995) 3, pp. 213-223.

Functional Interaction of Simulation and Data Analytics – Potentials and Existing Use-Cases

Kopplungsmöglichkeiten von Simulation und Data Analytics - Potenziale, Lösungsansätze und Anwendungsfälle

Christoph Laroque, Westsächsische Hochschule Zwickau, Zwickau (Germany),
christoph.laroque@fh-zwickau.de

Anders Skoogh, Maheshwaran Gopalakrishnan,
Chalmers University of Technology, Gothenburg (Sweden),
anders.skoogh@chalmers.se, mahgop@chalmers.se

Abstract: Discrete event simulation (DES) is very suitable to model the reality in a manufacturing system with high fidelity. Such models are easy to parameterize and they are able to consider several influences including stochastic behavior. However, simulation models are challenged, when it comes to operational decision support in manufacturing as well as logistics. Here, methods and algorithms from the area of (big) data analytics see growing importance in research as well as practical application. Much less likely is the winning combination of both in a common approach. This paper aims to describe these opportunities, both in general following the steps of a simulation study as well as on the basis of current research publications that have been researched by the authors.

1 Introduction

“Big data analytics is where advanced analytic techniques operate on big data sets. Hence, big data analytics is really about two things—big data and analytics—plus how the two have teamed up to create one of the most profound trends in business intelligence (BI) today” (Russom 2011).

Over the last decades, a large number of automatic data analysis methods as well as visual analytics methods have been developed and their application areas are still growing (Bange et al. 2015). However, the complex nature of many problems makes it necessary to include human intelligence at an early stage in the data analysis process. Big Data Analytics methods allow decision makers to combine their human flexibility, creativity, and background knowledge with the enormous storage and processing capacities of today’s computers to gain insights into complex problems. Using advanced visual interfaces, humans may also directly interact with the data

analysis capabilities of today's computer, allowing them to make well-informed decisions in complex situations (Thomas and Cook 2005).

Material flow simulation of production and logistics processes is already a well-established field of application for simulation technologies. Applications of simulation models as well as the generated data sets have grown enormously over the past years; since simulation models also get more and more detailed and by that complex, the amount of data to be analyzed is also growing. The analysis of the generated simulation results out of a large set of experiments today mostly builds on expert knowledge and human interaction during the analysis phase of a simulation study. Moreover, multiple techniques for the validation and verification of the corresponding simulation data as well as the simulation models is today mainly a manual process by the simulation expert. Big Data Analytics has the potential to enhance these processes for faster analysis during multiple steps of a simulation study and, in some cases, can even be used for a first result forecasting based on simplified mathematical models. This also may lead to faster decision making processes.

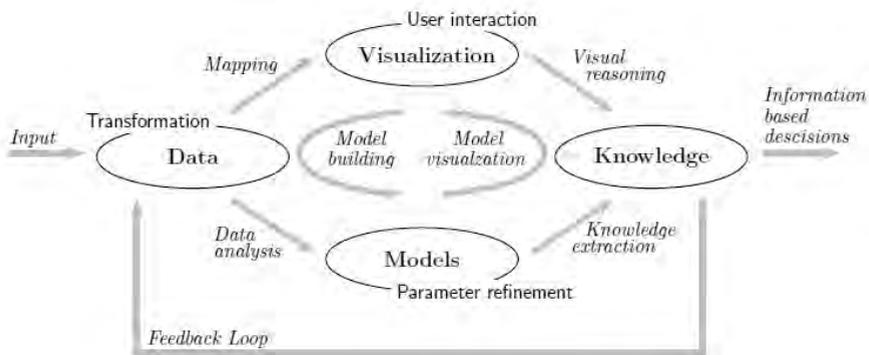


Figure 1: Schematic “Data-to-Knowledge” process

However, this combination of simulation and (big) data analytics methods has not yet been carried out systematically, though there are some existing use-cases in industrial practice. The capability of combined approaches coupling simulation and advanced analytical approaches is addressed only for a few specific applications. Consequently, no general framework exists to define this symbiosis and describe potential benefits.

In this paper, we propose a generalized concept to facilitate the utilization of (big) data analytics technologies in simulation studies. For each step in a sound simulation study, possible methodologies and connections are carried out and, later, existing use-cases from the field of production and logistics simulation are derived. Based on these findings and requirements, a first solution for a combined framework for simulation studies, supported by big data analytics is described.

The paper will therefore start with a brief motivation and the clarification of both methodological approaches. Then, the combinatorial integration of these methods will be carried out by following the steps of a simulation study. In a further section, existing use-cases will be classified in the framework. A summary will conclude the paper.

2 Relevant Terms and Definitions

Modern business computing, especially in the area of operations research, offers a wide variety of methods for solving complex problems planning, scheduling and control of production and logistic processes. Typically, new processes have to be designed or existing once have to be improved. For this, the processes are projected into models and then optimized by the use of simulation and/or optimization technologies in order to improve decision variables and resulting key performance indicators under a given set of restrictions. In simulation, this improvement is usually achieved by the iterative evaluation of multiple scenarios and their subsequent simulation results (Law and Kelton 2000). In the case of optimization, the optimal configuration is achieved by mathematical optimization algorithms or (meta-) heuristic approaches (Rardin 1997). Due to the high computational demand of both iterative evaluation and mathematical optimization, specific procedures as a combination of both simulation and optimization were derived. These procedures combine the advantages of both methods: an optimization algorithm can be used to automatically generate a specific model configuration, which then can be evaluated with simulation runs (Fu 2002). Those and other methods are typically described as Operations Research (OR).

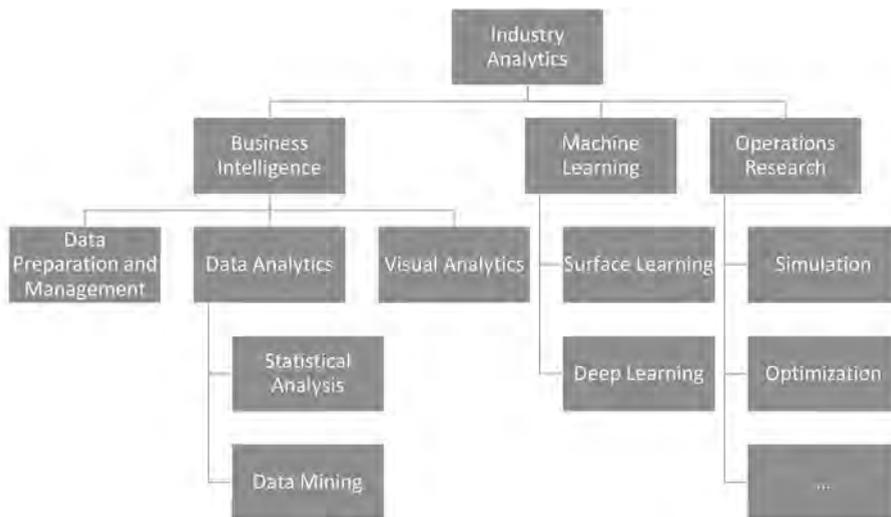


Figure 2: Conceptual structure of Keywords and Methods in Business and Industry Analytics

In the data-driven analysis of existing manufacturing or logistical systems, further mathematical methods are applied regularly in order to derive information that may support decision making processes, out of the data, that is already available in specific information systems, e.g. Enterprise Resource Planning (ERP), Customer Relationship Management (CRM), Manufacturing Execution Systems (MES) or Product Lifecycle Management (PLM). They are summarized as data analytics (for some insights, see Morabito 2015 and Runkler 2016). Together with some more fundamental methods on data management and handling and interactive

visualizations, this topic is covered as Business Intelligence (BI, e.g. Kemper et al 2010). The focus of these approaches is to deliver insights on what and why some effects happened. They are widely characterized as ‘descriptive’ and ‘diagnostic’ analytics. Based on these approaches, domain experts today work more and more on solutions that allow some significant forecasting based on this knowledge, either by some rather simplified mathematical models (predictive analytics, which answers what might happen) or by more sophisticated approaches that are summarized as prescriptive analytics. Here, deeper understanding of the systems behaviour is needed and more complex modelling and analysis from the OR-area are considered.

Besides that, a number of approaches can be found during the last years, where algorithms from the area of machine learning (Michalski et al. 1983) and artificial intelligence (ibid.) are used to automate these analytical steps, e.g. the pattern recognition in data or to derive new patterns and correlations in the growing amount of data, that is available in these systems. Figure 2 tries to give an overview about the links between these terms.

3 Integration from a Simulation Perspective

One of the main ideas of this contribution is to stress the potential benefit that methods from the area of data analytics may deliver in order to support the execution of a simulation study. Therefore, the typical steps of a sound simulation study according to (Law and Kelton 2000) are described shortly, followed by potential methods that could be carried out in order to support the single process steps.

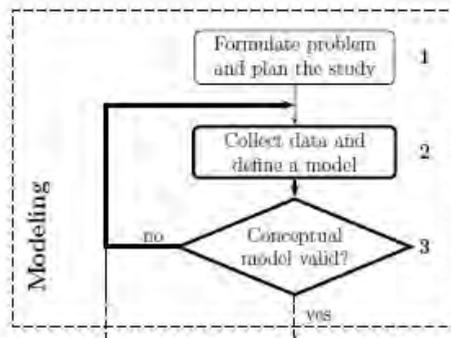


Figure 3: application of descriptive and diagnostic analytics for preparation and validation of the data for a simulation study

The usual and meaningful kick-off for a simulation study is the formulation of the goal of the research and a validation, that simulation is the appropriate method. Of course, in some cases, one might already see here some possibilities to gain some necessary insights with some simpler mathematical approaches. Since simulation studies aim at more complex systems, this consideration is skipped here, although there are lot of existing examples, where the benefits of a simulation study could be derived much easier with some fundamental data analytics or queuing theory applications. The next valuable step is the conceptual modeling of the system and, in

parallel, the gathering, validation and verification of the necessary data. If some empirical data already exists, then visual analytics and a couple of the statistical methods are typically carried out, that are also used within descriptive analytics, e.g. identification of the distribution, min-max-mean-analysis, etc. For validation, outlier detection and pattern recognition can be used manually or automatically as data mining applications. Moreover, out of the amount of available data, some first correlation analysis can be derived to gain insights on significant dependencies in the data. Available data sources can be filtered via cause-and-effect-analysis for those parameters that probably will be significant on the systems performance and should be considered therefore during the later experimentation phase.

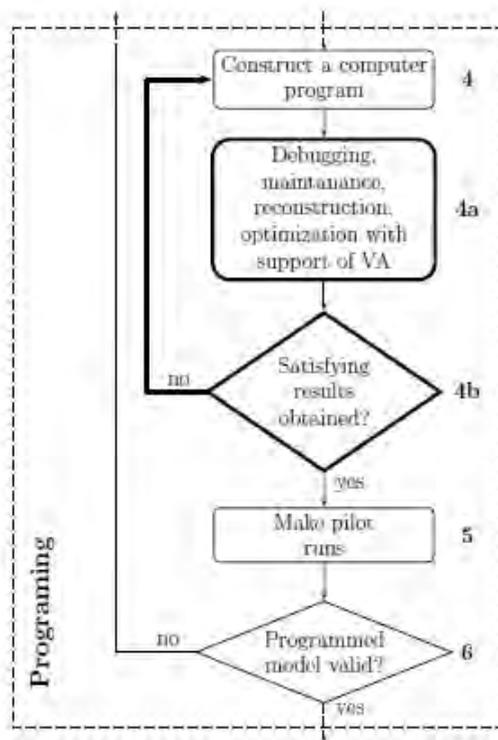


Figure 4: Validation of the formal simulation model by descriptive and visual analytics

After the successful completion of these steps, the formal representation of the conceptual model is applied in a simulation software. Here, more visual approaches are today regularly applied for the validation and verification of the simulation model and some first pilot tests are run. Here some first data as a result of the simulation model derived, which again can be analysed in order to validate the gathered results. The presumably identified correlations can be checked (again) and some further insights on the models behaviour is derived. If, for example, known correlations cannot be validated via the simulation model, this also might indicate some programming mistakes during the adoption of the conceptual to the formal,

computation model within the simulation software. The major advantage of some systematic application of the data analytics approaches, though, can be derived during the following phase of the simulation experimentation.

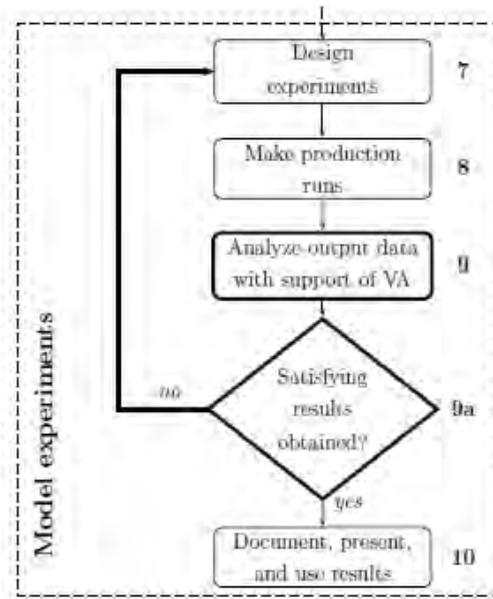


Figure 5: Applying Data Analytics in the output analysis of a simulation study

During the execution of the simulation scenarios, typically with multiple replications due to the system's stochastic behaviour, huge amounts of data are being created, that are to be analysed systematically in order to gain some useful insights according to the overall goal of the simulation study. Since during the last years, approaches like simulation optimization, simheuristics as well as distributed computation of the simulation experiments in cloud-based environments are of growing importance, the amount of data to be analysed is also growing rapidly. Here, especially automatic techniques from data analytics come into play. Data Mining as well as Machine Learning algorithms are both able to cluster the gained results and to identify patterns that cause changes in the performance indicators. This information might be presented to the simulation expert in order to enhance the process of system understanding. Moreover, powerful visualization tools are able to interactively visualize those huge amounts of data and thereby allow a manual interpretation of the performance metrics of the simulation model (visual analytics).

4 Use Cases

The authors did considerable research during the creation of this contribution in order to identify existing use-cases. Some of the use-cases are described as examples in this section. (However, there's of course more out there and further work existing. The authors are willing to share their entire research results on-demand.) Most of the latest research is carried out within the construction of modern manufacturing systems that

are highly integrated with their corresponding IT-system, so called cyber-physical systems. Industry 4.0 as the application of the Internet-of-Things (IoT) in this area play a major role in these modern applications for a decision support in the more and more dynamic, flexible and complex manufacturing processes.

4.1 Simulation and Data Analytics in Production and Manufacturing

In ‘Determining the optimal level of autonomy in cyber-physical production systems’ (Gronau et al. 2017) the authors state that traditional production systems are enhanced by cyber-physical systems (CPSs) and Internet of Things. As kind of next generation systems, those cyber-physical production systems (CPPSs) are able to raise the level of autonomy of its production components. To find the optimal degree of autonomy in a given context, their approach is formulated using a simulation concept. Based on requirements and assumptions, a cyber-physical market is modeled and qualitative hypotheses are formulated, which will be verified with the help of the CPPS of a hybrid simulation environment. Data Analytics are used to extract influence factors which explain the optimal degree of autonomy.

(Brodsky et al. 2015) propose an architectural design and software framework for fast development of descriptive, diagnostic, predictive, and prescriptive analytics solutions for dynamic production processes. The proposed architecture and framework shall support the storage of modular, extensible, and reusable Knowledge Base (KB) of process performance models. The approach requires a variety of underlying analysis tools, including data manipulation, optimization, statistical learning, estimation, and simulation.

(Jackson et al. 2016) focus on the aspect of reconfiguration of an aerospace production system. Here, advanced manufacturing technologies broadly used in automotive industry have limited application for typical UK aerospace manufacturing, as they require production volume and repetition of operations to deliver value. This paper discusses a framework of key technologies ranging from digital manufacturing concepts to a flexible fixture that enables reconfiguration in aerospace manufacturing systems. Initially, the overall architecture of the framework is presented illustrating the key components such as a cloud based data storage mechanism, an intelligent multi-product assembly station, kitting boxes embedded with sensors, a manufacturing network management portal and a decision support tool that combines data analytics and discrete event simulation. Afterwards, the main functionalities and technologies of the components are described and finally an industrial application scenario for the proposed framework is presented.

In ‘Integrating data analytics and simulation methods to support manufacturing decision making’ (Kibira et al. 2016) the authors denote, that in CPS, the manufacturing system itself is installed with smart devices such as sensors that monitor system performance and collect data to manage uncertainties in their operations. However, multiple parameters and variables affect system performance, making it impossible for a human to make informed decisions without systematic methodologies and tools. Further, the large volume and variety of streaming data collected is beyond simulation analysis alone. Simulation models are run with well-prepared data. The authors agree, that novel approaches, combining different methods, are needed to use this data for making guided decisions. Their contribution

proposes a methodology whereby parameters that most affect system performance are extracted from the data using data analytics methods. These parameters are used to develop scenarios for simulation inputs; system optimizations are performed on simulation data outputs. A case study of a machine shop demonstrates the proposed methodology. This paper also reviews candidate standards for data collection, simulation, and systems interfaces.

Many industries are applying various methods for optimizing energy use across the manufacturing life cycle. These methods are either physics-based or data-driven. Manufacturing systems generate a vast amount of data from operations and in simulations. Advances in data collection systems and data analytics (DA) tools have enabled the development of predictive analytics for energy prediction. Many of these prediction methods do not account for the uncertainty quantification-UQ (both in data and model). The work of Ronay and Bhinge (2015) addresses the issue of uncertainty in predictive analytics. It focuses on metal cutting processes and presents a Neural Networks (NNs) model to predict the required energy consumption during the manufacturing of a part on a milling machine. Moreover, it is shown that with advanced data collection and processing techniques, one can construct a model to predict the energy consumption of a machine tool for machining a part with multiple operations and process parameters.

4.2 Simulation and Data Analytics in Logistics

In 'Application of big data technology in support of food manufacturers' commodity demand forecasting' Nita (2015) states, that forecasting commodity demand for food manufacturers is very difficult to achieve because it is easily affected by variable factors such as the weather and the success or otherwise of advertising campaigns. The ambiguity of demand forecasting results in burdensome supply and demand adjustments and causes an increase in the logistics and production costs, stock-out, excessive stock and/or disposal losses. NEC applies one of its big data technologies, the heterogeneous mixture learning technology, to perform commodity demand forecasting and to automate and optimize the supply chain management systematization. In addition, NEC also applies machine learning to the simulation of sales measures in order to maximize their effects and to increase the sales volume.

Xu et al. (2015) expand their simulation optimization approach with big data analytics. In the first part of their contribution, they classify simulation optimization techniques afterwards, they review applications of simulation optimization in various contexts, with a more detailed discussions on logistics and manufacturing systems. Specifically, the authors then discuss how simulation optimization can benefit from various IT-technologies like cloud computing and high-performance computing and the integration of simulation optimization with big data analytics.

The focus of the contribution of Schuh et al. (2014) is the Short-term cyber-physical production management. However, a major trigger for the planning and safeguarding of the production facility, a high adherence to delivery dates is a logistic target. In consideration of the fact that material and information flows in production plants are getting more intersected and networked than ever before and customer demand tailored products in short throughput times, keeping an overview as well as responding properly becomes a huge challenge for the production manager. In their paper, the authors describe a new approach of cyber-physical short-term assistance of the

production manager with the goal to support the production controller by providing prioritized short-term actions through a combination of new sensor technologies, big data processing and simulation. The paper outlines the roadmap to short-term cyber-physical production management. With the help of visualization analytics, the application displays the effects of a performed action.

5 Summary and Outlook

As the general approach, as well as the given use-cases, show that in order to deploy a decision-support system for modern manufacturing and logistics systems, it is meaningful to integrate the classical material flow simulation approach with modern Data Analytics approaches and algorithms. Especially for applications, that aim at some model insight close to real-time, intended for the use in operational production planning and/ or (re-)scheduling,

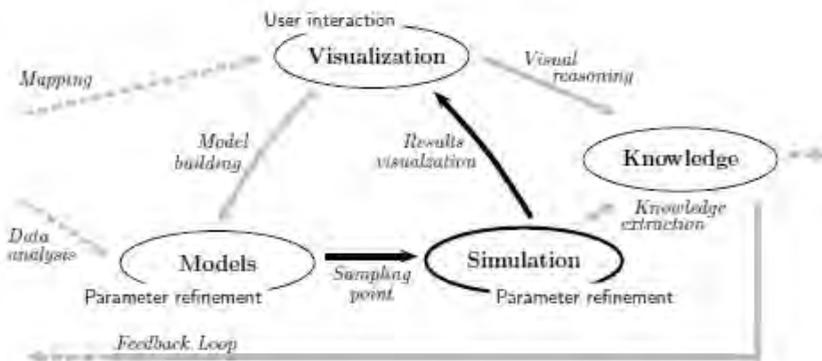


Figure 6: Simulation as an enhancement for the 'Data-to-Knowledge' process

From the data analytics perspective, simulation can be regarded as an additional source of knowledge and as an important multiplier of those systems, where real-world data are not (yet) existing or specific scenarios are to be 'tested' in a most realistic way. For the simulation expert, these advantages of our method is basic knowledge; for some data scientists, this might be new. Nevertheless, Data Analytics as a method pool in production and logistics is of growing importance and lot of current research deals especially with predictive approaches that should carry out some insights on the systems behavior. Their next step, prescriptive analytics, will strengthen the application of simulation-based approaches in decision-support systems on an operational level at the factory floor. Simulation tools as well as the applying experts better be ready then to handle complex models with huge amounts of data in more or less automated approaches with massive algorithmic support.

Acknowledgement

Some of the work presented in this contribution, especially in the interplay of simulation and visualization was carried out with the support of Betram Ledwa, student at the Technical University of Dresden in July 2014.

References

- Bange, C.; Grosser, T.; Janoschek, N.: Big Data Use Cases – Getting real on data monetization. BARC Research Study, 2015.
- Brodsky, A.; Shao, G.; Krishnamoorthy, M.; Narayanan, A.; Menasce, D.; Ak, R.: Analysis and optimization in smart manufacturing based on a reusable knowledge base for process performance models. IEEE International Conference on Big Data, DOI:10.1109/BigData.2015.7363902, 2015.
- Fu, M. C.: Optimization for simulation: Theory vs. practice. INFORMS Journal on Computing, 2002.
- Gronau N.; Grum, M.; Bender, B.: Determining the optimal level of autonomy in cyber-physical production systems. IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), DOI: 10.1109/INDIN.2016.7819367, 2017.
- Jackson, K.; Efthymiou, K.; Borton, J.: Digital Manufacturing and Flexible Assembly Technologies for Reconfigurable Aerospace Production Systems. DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.054, 2016.
- Kemper, H.-G.; Baars, H.; Mehanna, W.: Business Intelligence - Grundlagen und praktische Anwendungen – Eine Einführung in die IT-basierte Managementunterstützung, DOI: 10.1007/978-3-8348-9727-5 Springer Vieweg 2010.
- Kibira, D.; Hatim, Q.; Kumara, S.; Shao, G.: Integrating data analytics and simulation methods to support manufacturing decision making. Proceedings of the Winter Simulation Conference 2016, DOI: 10.1109/WSC.2015.7408324, 2016.
- Law, A.; Kelton, D.: Simulation Modeling and Analysis, McGraw Hill 2000.
- Michalski, R.-S.; Carbonell J.G.; Mitchell, T.M.: Machine Learning – An Artificial Intelligence Approach. DOI: 10.1007/978-3-662-12405-5, Springer, 1983.
- Morabito V.: Big Data and Analytics - Strategic and Organizational Impacts, DOI: 10.1007/978-3-319-10665-6, Springer 2015.
- Nita, S.: Application of big data technology in support of food manufacturers' commodity demand forecasting. NEC Technical Journal, 2015.
- Rardin, R. L.: Optimization in Operations Research, Prentice Hall, 1997.
- Ronay, A.K.; Bhinge, R.: Data analytics and uncertainty quantification for energy prediction in manufacturing. Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Big Data, DOI: 10.1109/BigData.2015.7364081, 2015.
- Runkler, T.-A.: Data Analytics - Models and Algorithms for Intelligent Data Analysis, DOI: 10.1007/978-3-658-14075-5, Springer 2016.
- Russom, P.: Big Data Analytics. TDWI BEST PRACTICES REPORT, 2011.
- Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hempel, T.: Short-term cyber-physical production management. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.024, 2014.
- Thomas, J.; Cook, K.: Illuminating the Path: Research and Development Agenda for Visual Analytics. IEEE-Press 2005.
- Xu, J.; Huang, E.; Chen, C.-H.; Lee, L.H.: Simulation optimization: A review and exploration in the new era of cloud computing and big data. Journal of Operational Research, DOI: 10.1142/S0217595915500190, 2015.

Improving the Accuracy of Cycle Time Estimation for Simulation in Volatile Manufacturing Execution Environments

Verbesserung der Schätzgenauigkeit von Zykluszeiten für die Simulation von volatilen Fertigungsumgebungen

András Pfeiffer, Dávid Gyulai, László Monostori, Institute of Computer Science and Control, Hungarian Academy of Sciences, Budapest (Hungary),
pfeiffer.andras@sztaki.mta.hu, gyulai.david@sztaki.mta.hu,
monostori.laszlo@sztaki.mta.hu

Abstract: The paper introduces a decision support architecture with an integrated, self-building simulation module for the validation of the calculated manufacturing capacities and analysis of the effect of possible actions in volatile manufacturing environments. The paper addresses the simulation module in which an effective filtering algorithm is proposed for cleaning cycle time log data provided by a Manufacturing Execution System (MES), as necessary input for simulating manufacturing processes. The main functionalities and advantages are highlighted by a real industrial case study.

1 Problem Formulation

At the operational level of manufacturing systems difficulties arise from unexpected tasks and events, non-linearity, and a multitude of interactions while attempting to control various activities in dynamic shop floors. The selection of the most appropriate production control decision for a given assignment, as well as the prediction of waiting times, workloads or utilizations of the resources are not trivial tasks, although they can be supported by simulation-based evaluations (Pfeiffer et al. 2007; Bagchi et al. 2008; Watt 1998).

Therefore, based on previous results (Pfeiffer et al. 2016; Pfeiffer et al. 2011; Monostori et al. 2007), we propose a decision support architecture, in which the integrated, self-building simulation module can be applied for validation of the calculated manufacturing capacities, a-priori recognition of due date deviations and analysis of the effect of possible actions taken. In the research presented in this paper a special emphasis is given to the prediction and evaluation of the production on a daily, rolling time horizon (e.g., work in process (WIP) trajectories, machine utilizations).

An important issue regarding short-term (operational level) simulation is the automatic collection and definition of simulation input data. Therefore, as the main focus of the proposed paper a new cycle time definition method (filtering method) is presented, as well as a self-building simulation procedure is described in details.

2 Simulation-supported Production Control

2.1 Literature Review

The discrete-event simulation (hereafter referred to as simulation) approach has been applied to decisions in scheduling and control, related to production applications (Banks 1998; Law and Kelton 2000; O’Rielly and Lilegdon 1999). The simulation models that are used for making or evaluating these decisions (e.g., by projecting different key performance indicators, KPIs) generally represent the flow of materials to and from processing machines and the operations of machines themselves (Rabelo et al. 2003). Potential problems can be identified and can be corrected using a simulation model. By far the most common use of simulation models is for operational decisions such as scheduling or dispatching (Law and Kelton 2000).

As it is presented in the related works describing some of the application areas, as well as the recent solutions of simulation in production control, simulation has been typically used for off-line decision making. Consequently, effective integration into the control process of production was restrained. One of the limitations of its use in on-line decision making is the considerable amount of time spent in gathering and analysing data. In quasi real-time control (hours, minutes), however, the three key issues are data acquisition, quick response and instantaneous feed-back. As a result, decision makers mostly apply simulation primarily for off-line decision support and not for the critical on-line decision making that may arise.

2.2 Proposed Simulation-based Prediction Framework

The main goal of the framework to be introduced here is to provide a self-building production simulation, capable of both prospective (e.g. locate anticipated disturbances, identify trends of designated performance measures), and reactive (e.g. gathering statistics on resources) simulation functionalities. Self-building simulation means that the simulation model is built up by means of the combination of the MES data as well as the knowledge extracted from the MES data (e.g. resource and execution model). In addition to the automatic model building feature, main requirement of the solution is to minimize the response time of the experiments and to enable the quasi “real-time” applicability of the simulation (Pfeiffer et al. 2016; Vánca et al. 2011).

Regarding the main operation modes of the simulator in the proposed architecture (Fig. 1) are as follows:

- Off-line validation, sensitivity analysis and statistical modelling of the system. Evaluation of the robustness of the system against uncertainties (e.g., different control settings, thresholds and system load levels). Consequently, this scenario analysis might point out the resources or settings which can endanger the normal operation conditions. In Figure 1 off-line simulation represents the comprehensive model of the plant.

recognized which might endanger the production, a prospective analysis and classification of the deviations are performed. At this point the models obtained in the previous, off-line mode are combined with the actual simulation results in order to analyze the possible effect of the deviation, and moreover, to filter out unnecessary interventions. For instance, in Figure 1 LT is expected to be out of the range defined by upper bound (UB). Consequently, reactive simulation mode is initiated, where a predefined set of possible solutions (Decision alternative 1 – Decision alternative n, denoted as, e.g., Alt 1) for normalizing the production is preformed, highlighted as disturbance handling mode in Figure 1.

2.3 Defining Operation Cycle Times on MES Data

In simulation systems representing a complex, wide scale production system, exact processing times are crucial for successful and credible simulation results.

Defining process times for simulation models based on logged production (e.g. MES) data is a well-known and widely used method. Bagchi et al. (2008) present a linear regression method for calculating process times based on raw process times (RPT) collected for single, batch and sampling tool types. Sivakumar and Chong (2001) present a case study, where the theoretical process times are defined by the mean values, however the authors state that based on the wide distribution in theoretical process times, theoretical ratio based on mean is indefinite.

The main goal is to define the so called basic process time for the given operation and machine (or tool) relations, i.e., to find for each case the real, technologically acceptable minimum cycle times by applying the filtering algorithm proposed. Since several factors influence the raw process time as for instance different waiting times in the input buffer of machines, different operators, etc., the most relevant way is to scrape the raw process times from the effect of disturbing factors, and thus, to identify the relevant lower bound (excepting unnecessary, problematic data), i.e., the shortest possible raw process time of the data. It is clear that by calculating the mean or the mode values for the data set does not provide the necessary lower bound.

3 Proposed Methods and Preliminary Simulation Results

As one of the most important issues regarding the self-building simulation system, a significantly more effective method (compared to e.g. mean or modus statistical methods) had to be developed in order to have reliable and up-to date cycle times in the simulation.

The paper focuses on the novel method developed for filtering raw processing time data for cycle time calculation, and on applying it for decision support based on the proposed self-building simulation tool. The effectiveness of the methods is presented through computational experiments on data provided by a real industry case study.

3.1 Filtering MES Log Data

In order to extend the capabilities of the simulation towards prediction and estimation of future scenarios' results, the use of statistical learning models is proposed.

Basically, statistical learning refers to a set of methods for understanding and learning from data and providing solutions to understand the correlations among parameters and processes James et al. (2013). Thus, as one of the most important issues regarding the self-building simulation system, a significantly more effective method (compared to e.g., mean or modus statistical methods) had to be developed in order to have reliable and up-to date cycle times in the simulation.

3.1.1 Cycle Time Definition Algorithm

Contrary to several cases shown in the literature review, here the raw cycle times for single-capacity and multi-capacity (pipeline) machines cannot be defined directly based on the logged data, i.e., cannot be calculated as the difference between claim-out and claim-in timestamps (see Fig. 2).

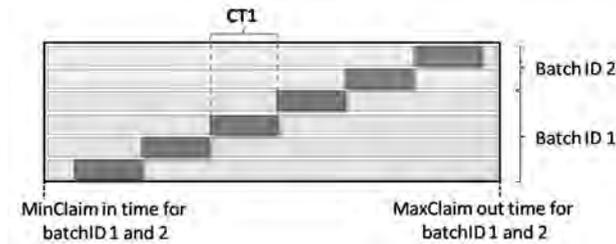


Figure 2: Minimum and maximum claim-in and claim-out times for a lot containing six products in two different batches, logged on a selected single-capacity machine

Due to the distinctiveness of the claiming procedure, available raw cycle times constantly contain waiting times in front of and after the tools, moreover, those lots where the number of products are greater than 1 (e.g. it equals six in the example given in Fig. 2), the raw cycle time contains the processing time (for single) or cycle and tact (for multi) time for all the products in the lot (raw cycle time is the difference between MaxClaim-out time and MinClaim-in time). Regarding batch tools, the raw cycle time calculated with the above method contains the waiting times only. Therefore, the problem for cycle time definition is to first create raw basic cycle times calculated for one product (CT1, Fig. 2) and second, to calculate the relevant lower bound for each existing distinct operation / product type pairs. Calculated CT1 values are stored in the MES database and used by the simulation for calculating lot cycle times, described in details in Section 2.2. Instead of artificial groups, batches are considered as the basis of the cycle time definition (1).

$$CT1_i = \frac{\max T_{i,out} - \min T_{i,in}}{n_i} \quad (1)$$

where $CT1_i$ is the basic cycle time calculated for batch i , and n_i is the number of parts assigned to batch i .

The following algorithm describes the cycle time calculation method developed:

1. Get all product type /operation type pairs from MES Log data (e.g., 80,000 exists in the case-study presented).

2. For a defined pair, basic cycle times (CT1) are calculated based on the MES log data, regarding each batch in consideration (e.g., for more than 50 logs available in the MES Log database).
3. For the defined pair the type of tools (single, multi, batch) on which the operation can be processed are defined.
4. Classification algorithm is applied to identify the relevant minimum value for CT1.
5. If further product type/operation type pair exist then select next pair and return to 2.
6. Stop.

Figure 3 presents the calculated CT1 (solid red line at 528 sec) for a given operation type and product type pair. Raw cycle time values are coloured by the product subtypes. The mean value is 1,920 seconds, which is more than the triple of the CT1 value calculated by the new method, though, an upper bound has been applied for eliminating extremely extraneous data.

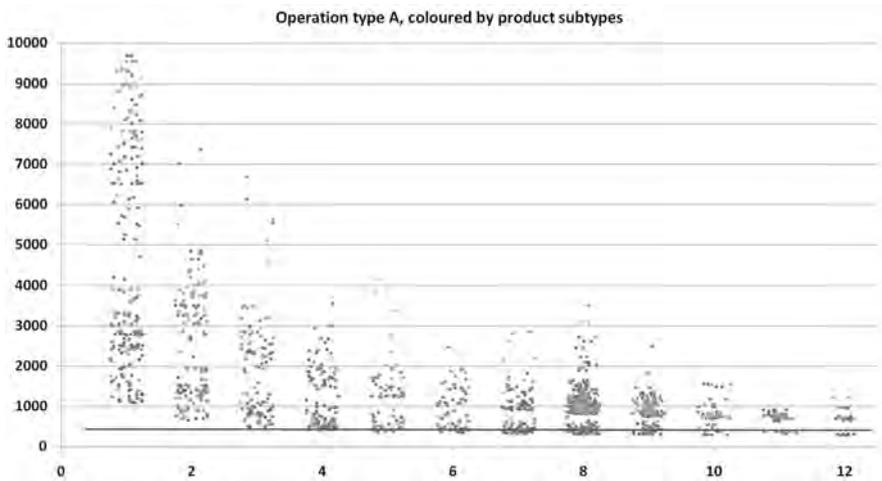


Figure 3: Resulted CT1 for a selected operation type and product type pair (on the X-axis the number of parts in one batch, while on the Y-axis the cycle times in seconds are highlighted)

3.1.2 Classification Algorithm for CT1

In the previous section, the main algorithm of the developed cycle time definition method was described, which needs further specification in order to be able to recognize the findings regarding the calculation of the lower bound of raw CT values. All the calculated raw cycle times are grouped into classes and unnecessary data is removed, according to the following method:

1. Define the number of classes. The required number of classes (k) is defined by the Sturges' rule (Hyndman 1995) $k = 1 + \log_2 n$, where n is the number of observations.
2. Define class bounds. This is calculated by dividing the range (upper bound, UB) of the observed values to k classes. Class width (CW) is then equals to UB/k .

3. Cut unnecessary data both from left and right side (typically the 10 % of total „weight” can be neglected). For instance, in top and middle charts in Figure 4, values in the classes marked with red circles are removed from the data set (i.e., class bound are set so that these data will be set out of the range).
4. If no more data can be neglected continue, else return to 2.
5. Define maximum derivative between classes (e.g. red arrow pointing at class 3 in the bottom chart in Figure 4.)

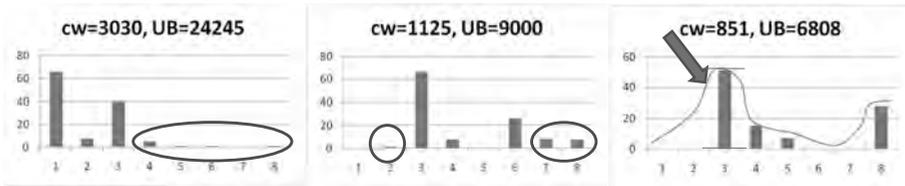


Figure 4: Example of three different stages of the classification algorithm

CT1 equals the mean of the lower and upper class bounds. The method presented here will find the steepest part of an imaginal curve fitted to the classified CT1 values. Great potential can be found in the possible improvement of the classification algorithm. For instance, increasing the number of classes after the last point reached in the algorithm, or sweeping the class bounds around a selected area are both reasonable solutions for the development.

3.2 Computational Experiments

3.2.1 Cleaning Raw Data

The methods introduced in the paper has been tested on a large-scale industrial data set. The methods in the prototype system has been implemented in R.

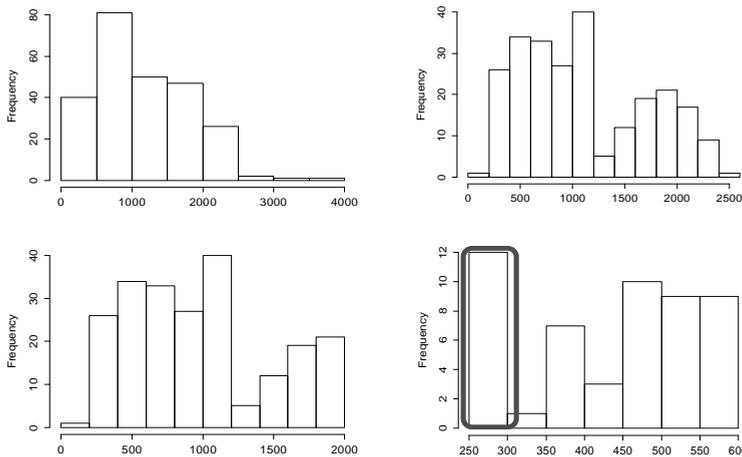


Figure 5: Histograms for resource ID 42 (with starting limit 4000), 1st, 3rd, 5th, and 15th iteration (X-axis represents time limit values, while Y-axis is the frequency)

The system cleans raw MES log data during the test procedure provided here by affording cycle time definition for selected machines, operations and product type triplets. The test data set for the analysis contains more than 50 k log entries for 13 variables (note that the real system provides 10 k entries daily).

As an illustrative example of the results to be presented, in Figure 5 a typical case is highlighted for a selected machine. The original range for the cycle time has been reduced to 250-300.

3.2.2 Validation – Comparison of Throughput

In order to have credible results computed by the simulation model, a comprehensive validation procedure is mandatory. In the followings, a short example is given about the validation of throughput values.

One stream of the validation procedure of the proposed system is based on the comparison of the simulated WIP prediction results (simulated log) with the real original data (Fig. 6). This validation procedure serves as a feed-back for the iterative fine-tuning (trace technique, Law and Kelton (2000)) of the execution policies, tool models, process times and dispatching rules applied in the simulation.

In Figure 6 the results of a comparison for one-week period is highlighted. If the total number of products in the system (WIP) is considered as 100 %, then the ratio of exiting products all together in the simulation for the one-week time horizon in consideration is 1.222 %, while the real, log based ratio is 1.306 %. The difference between the predicted and the real total throughput is relatively low (6.38 %), however the distinct steps in the log based curve cannot be represented exactly with the simulation.

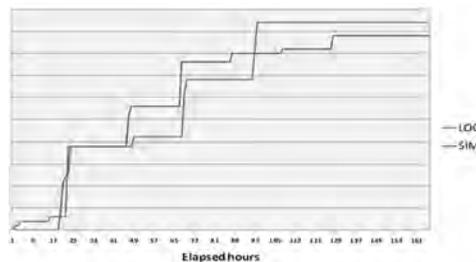


Figure 6: Simulated and real throughput diagram, noted as SIM and LOG. X-axis represents the elapsed hours, while Y-axis the cumulated number of products exiting.

4 Conclusions

The paper introduced a decision support architecture with an integrated, self-building simulation module for the validation of the calculated manufacturing capacities, and analysis of the effect of possible actions in volatile manufacturing environment. The paper addressed the simulation module in which an effective filtering algorithm is proposed for cleaning cycle time log data provided by a MES, as necessary input for simulating manufacturing processes. A novel cycle time definition algorithm was

proposed for raw basic cycle time calculation. However, further filtering of raw cycle times was needed, thus a new method, based on classification, defining lower bounds for effective cycle times were provided. The main functionalities and advantages were highlighted through a real industrial case study and validated by simulation experiments. Further research work has to be taken on applying the above introduced methods on an online, close-loop manner, making short-term simulations for decision support more effective.

Acknowledgements

The work for this paper was supported by the European Commission through the H2020 project Centre of Excellence in Production Informatics and Control (EPIC, Ref. No.: 739592) and by the GINOP-2.3.2-15-2016-00002 grant.

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: Mason, S.J.; Hill, R.R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J.W. (eds.): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. 2009, pp. 2021-2029.
- Banks, J.: Handbook of Simulation, Principles, Methodology, Advances, Application and Practice. John Wiley & Sons Inc 1998.
- Cowling, P.; Johansson, M.: Using real time information for effective dynamic scheduling. *European Journal of Operational Research* 139 (2002), pp. 230-244.
- Honkomp, S.J.; Mockus, L.; Reklaitis, G.V.: A framework for schedule evaluation with processing uncertainty. *Comp. and Chem. Eng.* 23 (1999), pp. 595-609.
- Hyndman, R.J.: The problem with Sturges' rule for constructing histograms. Department of Econometrics and Business Statistics, Monash University, Clayton, Victoria, Australia, 1995, pp. 1-2.
- James, G.; Witten, D.; Hastie, T.; Tibshirani, R.: An Introduction to Statistical Learning. New York: Springer 2013.
- Kim, Y.; Lee, D.; Kim, J.; Roh, H.: A simulation study on lot release control, mask scheduling, batch scheduling in semiconductor wafer fab facilities. *Journal of Manufacturing Systems* 17 (1998) 2, pp. 107-117.
- Klein, M.; Kalir, A.: Improved simple simulation models for semiconductor wafer factories. In: Perrone, L.F.; Wieland, F.P.; Liu, J.; Lawson, B.G.; Nicol, D.M.; Fujimoto, R.M. (eds.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 2006, pp. 1836-1839.
- Law, A.; Kelton, D.: Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill 2000.
- Lin, J.T.; Wang, F.; Yen, P.: Simulation analysis of dispatching rules for an automated interbay material handling system in wafer fab. *International Journal of Production Research* 39 (2001) 6, pp. 1221-1238.
- Monostori, L.; Kádár, B.; Pfeiffer, A.; Karnok, D.: Solution approaches. To real-time control of customized mass production. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2007) 1, pp. 431-434.
- O'Reilly, J.J.; Lilegdon, W.R.: Introduction to FACTOR/AIM. In: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999, pp. 201-207.

- Pfeiffer, A.: Novel Methods for Decision Support in Production Planning and Control, Thesis (PhD). Budapest University of Technology and Economics, 2007.
- Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.; Vén, Z.; Popovics, G.: Co-analysing situations and production control rules in a large-scale manufacturing environment. In: 44th CIRP Int. Conf. on Manufacturing Systems – New Worlds of Manufacturing, Wisconsin, Madison (USA), 2011, paper No. 101.
- Pfeiffer, A.; Gyulai, D.; Kadar, B.; Monostori, L.: Manufacturing lead time estimation with the combination of simulation and statistical learning methods. *PROCEDIA CIRP* 41 (2016), pp. 75-80.
- Rabelo, L.; Helal, M.; Jones, A.; Min, J.; Son, Y.J.; Deshmukh, A.: A hybrid approach to manufacturing enterprise simulation. In: Proc. of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003, pp. 1125-1133.
- Sabuncuoglu, I.; Kizilisik, O.M.: Reactive scheduling in a dynamic and stochastic FMS environment. *Int. J. of Production Res.* 41 (2003) 17, pp. 4211-4231.
- Sivakumar, A.I.; Chong, C.S.: A simulation based analysis of cycle time distribution, and throughput in semiconductor backend manufacturing. *Computers in Industry* 45 (2001) 1, pp. 59-78.
- Smith, S.F.: Knowledge-based production management: Approaches, results and prospects. *Production Planning & Control* 3 (1992) 4, pp. 350-380.
- Váncza, J.; Monostori, L.; Lutters, E.; Kumara, S.R.; Tseng, M.; Valckenaers, P.; Van Brussel, H.: Cooperative and Responsive Manuf. Enterprises, *CIRP Annals–Manuf. Technology* 60 (2011) 2, pp. 797-820.
- Vieira, G.E.; Herrmann, J.W.; Lin, E.: Predicting the performance of rescheduling strategies for parallel machines systems. *Journal of Manufacturing Systems* 19 (2000), pp. 256-266.
- Watt, D.G.: Integrating simulation-based scheduling with MES in a semi-conductor fab. In: Benjamin et al. (eds.): Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998, pp. 1713-1715.
- Wilhelm, R., et al.: Finite Schedule Monitoring and Filtering in a Computer Integrated Manufacturing Environment. *Annals of the CIRP* 49 (2000) 1, pp. 335-338.

Industrie 4.0 in der Entsorgungslogistik am Beispiel eines Müllheizkraftwerkes – Modellierung und exemplarische Simulation mit Petri-Netzen

Fourth Industrial Revolution in the Recycling and Waste-disposal Industry Using an Example of a Waste-to-energy Plant – Modelling and Exemplary Simulation with Petri Nets

Hubertus Franke, Torsten Czerniewski, Thomas Felsch,
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Salzgitter (Germany),
hu.franke@ostfalia.de, t.czerniewski@ostfalia.de, th.felsch@ostfalia.de

Abstract: Legislation requires a sustainable lifecycle management, which offers companies the opportunity to establish themselves on the market. These companies find themselves in competition with each other and using the newest technological developments for securing the future market position. Therefore, the consequences of the fourth industrial revolution effect the recycling and waste disposal industry. In this article it is roughly shown, which fields of application in the range of “Industry 4.0” regarding to the recycling industry are possible. Furthermore, this article set out how a selected range within a closed waste-to-energy plant can be modelled and simulated with petri nets. The aim of the present document is to describe the foundations of the disposal logistics system, to exploring the possibilities of the fourth industrial revolution in this functional logistic sector and to model and simulate selected fields with petri nets.

1 Einleitung

Jeden Tag fallen in Deutschland verschiedenste Abfälle an: Hausmüll, Kunststoffreste, Papier, Gewerbeabfälle u. a. m. Für jede dieser Abfallarten ist eine eigene Entsorgungslösung zu finden (vgl. hierzu Dutz 1997, S. 235 ff.; Fortmann und Kallweit 2000, S. 125 ff.; Göpfert 2008, S. 154 ff.; Huber und Laverentz 2012, S. 133 ff.). Ihre Kosten sollen branchenabhängig bei 1 bis 3 % vom Umsatz und zwischen 5 und 15 % der Gesamtlogistikkosten liegen (vgl. Göpfert 2008, S. 162). Geschlossene Stoffkreisläufe als Gegenstand der sogenannten Rückführ- bzw. Entsorgungslogistik bilden die Basis einer an grünen bzw. nachhaltigen Aspekten orientierten Logistik. (vgl. Hausladen 2011, S. 1; Piontek 2016, S. 282) Die Entsorgungslogistik als jüngster Ableger der funktionalen Logistikauffassung hat sich so erst in den letzten Jahrzehnten entwickelt. Ihr wird die Aufgabe der Gestaltung von

Rückstandsströmen zugewiesen. Im Mittelpunkt stehen alle logistischen Maßnahmen zur Vorbereitung und Realisierung der Entsorgung. Daher beinhaltet die Entsorgungslogistik alle planenden, steuernden und ausführenden Tätigkeiten, die sich auf die Verwendung, Verwertung und Beseitigung der jeweiligen Entsorgungsobjekte beziehen (vgl. Dutz 1997, S. 236; Hausladen 2011, S. 73; Huber und Laverentz 2012, S. 133).

Der Begriff „Industrie 4.0“ wird primär für Produktions- und begleitende Logistikprozesse angewendet, ist aber auch auf die Entsorgungslogistik übertragbar. Die Industrie 4.0 beschäftigt sich unter anderem mit Robotersystemen, die mittels einer vernetzten Kommunikation „semi-intelligent“ Entscheidungen treffen und Prozesse koordinieren können. Diese können in der Entsorgungslogistik bereits vielfältig eingesetzt werden. Es ist daher hilfreich, eine Modellierungsmethode zu verwenden, die sowohl die Interaktion der Roboter beschreibt, als auch die Basis für mögliche Simulation liefert. Petri-Netze bieten einen Ansatz, der diesen Anforderungen entspricht. In der vorliegenden Publikation soll daher über eine Petri-Netz-Simulationsumgebung gezeigt werden, wie Müll-Sortier-Roboter dezentral, (semi-)intelligent miteinander Sortierprozesse „verhandeln“.

1.1 Konkrete Zielsetzung

Zielsetzung des vorliegenden Beitrages ist es daher, die Entsorgungslogistik zu schildern, die Möglichkeiten von Industrie 4.0 in diesem funktionalen Logistikkbereich auszuloten und die Chancen zur Modellierung von Entsorgungsprozessen aufzuzeigen. In einem geschlossenen Stoffkreislauf soll daher exemplarisch eine mögliche (semi-)intelligente Interaktion von Müll-Sortierrobotern genauer untersucht werden. Hier bietet sich die Möglichkeit, eine kooperierende und kommunizierende Roboterkommunikation zu beschreiben und zu simulieren, wo Roboter Müllobjekte nach Priorität auswählen und ein „Greifen“ über eine automatisierte Kommunikation „verhandeln“.

1.2 Methodisches Vorgehen

Zur Erreichung des Ziels wird nach der Einleitung im ersten Abschnitt im zweiten Teil die Entsorgungslogistik erörtert. Die Möglichkeiten von Industrie 4.0 in der Entsorgung werden anschließend aufgezeigt. Im darauf folgenden Abschnitt wird die Modellierung und Simulation von Entsorgungsprozessen exemplarisch dargestellt. Als Modellierungsgrundlagen sollen spezielle Petri-Netze gewählt werden. Es kann somit die (semi-)intelligente Kommunikation in einem Industrie 4.0-Szenario verdeutlicht werden. Als Entwicklungsumgebung wird ©renew (vgl. Kummer et al. 2004) gewählt. Diese Entwicklungsumgebung bietet die Möglichkeit, das modellierte Robotersystem zusätzlich zu simulieren. Eine Ergebniszusammenfassung, ein Fazit und ein Ausblick runden den Beitrag schlussendlich ab.

2 Grundlagen der Industrie 4.0 in der Entsorgungslogistik

Auf die Entwicklung der Entsorgungslogistik wirken verschiedene Einflussfaktoren. Dazu gehören innerbetriebliche Rahmenbedingungen, bei denen z. B. die Verknappung von Deponiekapazitäten zu steigenden Entsorgungskosten führt.

Ebenso verändern sich Kundenanforderungen, indem zunehmend umweltverträgliche Produkte verlangt werden. Insbesondere aber haben verschiedene gesetzliche Regelungen, wie z. B. das Kreislaufwirtschafts- und Abfall-, das Produkthaftungs- oder das Umwelthaftungsgesetz, dazu geführt, dass der Materialeinsatz in der Güterherstellung verringert und für die eingesetzten Stoffe eine Mehrfachnutzung angestrebt wird (vgl. Knoch 1997, S. 239).

„Industrie 4.0“ stellt die vierte industrielle Revolution dar und bedeutet die Kommunikation und Vernetzung zwischen Personen, Maschinen und Gegenständen auf der Basis des „Internet der Dinge“ als virtuelle Repräsentation dieser Objekte. In der Entsorgungslogistik kann diese Vernetzung über verschiedene IT-Systeme realisiert werden. So können die Fahrzeuge miteinander oder mit dem Werk „kommunizieren“ und ressourcenschonend gesteuert, die Übertragung von Dokumenten zwischen den Werken oder mit Behörden digitalisiert oder die Anlagen und Sortierroboter über Algorithmen gesteuert werden. Für weiterführende Informationen aus dem Bereich Industrie 4.0 wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. Bauernhansl und ten Hompel 2014; Manzei et al. 2016; Roth 2016).

2.1 Prozesse in geschlossenen Entsorgungskreisläufen eines Müllheizkraftwerkes

Für geschlossene Stoffkreisläufe bieten spezialisierte Dienstleister Services für Transport-, Lagerungs- und Umschlagprozesse an. Bezüglich der „Verwendung“ und „Verwertung“ ist für sogenannte „Wertstoffe“, die vorwiegend in geschlossenen Stoffkreisläufen anfallen, eine verbesserte Vorsortierung und damit eine erhöhte Recyclingquote anzustreben. Die Objekte dieser primär gewerblichen Rückstände (z. B. Elektroschrott, Kunststoff, Holz) können durch ein Mess-Wiege-System mit Scannern, Kameras und Waagen erfasst, analysiert und dadurch effizienter sortiert werden. In Abhängigkeit von den zu sortierenden Materialien ist ggf. eine Sortierung durch Roboter möglich, die miteinander kommunizieren können.

Unterstützt durch künstliche Intelligenz (KI) können sich die Roboter durch maschinelles Lernen schnell an neue Sortier- und Greifaufgaben anpassen. In offenen Kreisläufen kann Industrie 4.0 bereits an der Quelle eingesetzt werden: Durch Füllsensoren in Mülltonnen sowie durch internetbasierte Abholaufträge z. B. für Sperrmüll sind Entsorgungsbetriebe in der Lage, starre Abfuhrhythmen durch eine bedarfsorientierte Abholung zu ersetzen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten aus dem Bereich der Industrie 4.0 sollen hier aufgrund des Umfangs dieser Arbeit nur kurz dargestellt werden:

1. Informationsfluss intern und extern: Digitalisierung der Prozesse und Hinterlegung in der Cloud
2. Schnittstellen zu den Geschäftspartnern: Vernetzung mit den Partnern
3. Transport/Verkehr: Flottenmanagement, Onboard-Navigationssysteme, Elektro-Lkw
4. Vorsortierung: Mess-Wiege-System, Greifsystem (KI)
5. Management von Maschinenausfällen: Früherkennung, Wartung
6. Datenerfassung: Sensorsysteme, Videoüberwachung
7. Bedarfsorientierte Müllabfuhr: Füllsensoren, internetbasierte Abholaufträge

Für einen geschlossenen Kreislauf von Wertstoffen zeigt Abbildung 1 exemplarisch den Prozess mit Nutzung eines Wertstoffhofes. Neben der „Digitalisierung“ (1), der „Vernetzung“ (2) und verschiedenen Maßnahmen im Bereich „Transport/Verkehr“ (3) ist in der Sortierung der Einsatz von „Mess-Wiege-Systemen“ und „Greifsystemen auf KI-Basis“ (4) denkbar. *Dieser Punkt dient als Kernbetrachtung in dieser Publikation.* Im Bereich „Verwendung/Verwertung“ sind die Verfahren „Früherkennung/Wartung“ (5) und „Sensorsysteme/Videouberwachung“ (6) einsetzbar.

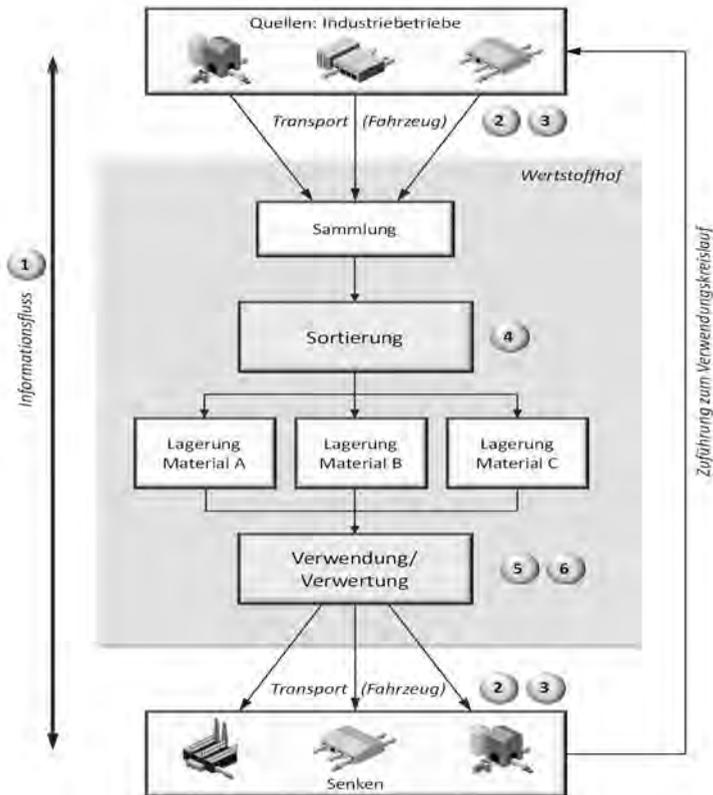


Abbildung 1: Geschlossener Stoffkreislauf (Wertstoffe)

2.2 Petri-Netze zur Modellierung und Simulation

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 (vgl. Baumgarten 1996). Sie sind sehr gut geeignet, um Strukturen und Prozesse in der Entsorgungslogistik zu beschreiben. Strukturell bestehen Petri-Netze aus zwei Sorten von Elementen. Zum einen aus Stellen, die grafisch durch einen Kreis oder eine Ellipse dargestellt werden, zum anderen aus Transitionen, die als Quadrat oder Rechteck dargestellt werden (vgl. Reisig 2010, S. 22). Diese Elemente werden durch gerichtete Kanten verbunden,

welche grafisch 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 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).

2.2.1 Petri-Netze zur Modellierung in der Entsorgungslogistik

Die Entsorgungslogistik, auch Re-Logistics genannt, ist ein wichtiger Teilbereich der klassischen Logistik, wo lediglich der Materialfluss in der Regel in eine umgekehrte Richtung verläuft. Da die logistischen Abläufe ähnlich wie in anderen Logistikbereichen verlaufen, würde eine Modellierung auch ähnlich verlaufen. Dort ist die Modellierung mit Petri-Netzen sehr häufig vertreten, während sie in der Entsorgungslogistik noch nicht zum Einsatz kam. Gemäß den grundlegenden Ausführungen in Kapitel 2.3 eignen sie sich dennoch gerade für das zuvor beschriebene Szenario einer Müll-Roboter-Interaktion, um Entsorgungsprozesse, gemäß Abbildung 1 zu beschreiben. Der Nachteil ist allerdings, dass ab einem gewissen Detaillierungsgrad Petri-Netze sehr überladen und für Menschen schwer überschaubar werden. Aufgrund dieser Komplexität und um den Rahmen dieser Veröffentlichung nicht zu sprengen, ist auf eine vollständige Beschreibung der Abläufe aus Abbildung 1 durch Petri-Netze verzichtet worden. Es soll hierbei lediglich in Kapitel 3 ein Teilbereich aus Abbildung 1, nämlich die Sortierung durch einen Sortierroboter, gemäß Kapitel 2.1 Punkt (4) beschrieben werden.

2.2.2 Die Petri-Netz-Simulationsumgebung

Die Entwicklungsumgebung ©renew (vgl. Kummer et al. 2004) ist ein grafischer Editor für verschiedene Arten von Petri-Netzen, insbesondere Prädikat-Transitions-Netze (PrT-Netze). PrT-Netze mit individuellen Marken sind Erweiterungen von einfachen Petri-Netzen. Sie werden auch als "coloured petri nets" bezeichnet. Hier werden den Marken Werte zugeordnet, wodurch man sie unterscheiden und mit ihnen rechnen kann.

Mit Hilfe der Entwicklungsumgebung ©renew können beliebige Petri-Netze gesamt, aber auch in Einzelschritten visualisiert und simuliert werden. In Abbildung 2 ist beispielhaft aufgeführt, wie eine Transition mit der Bezeichnung „ $f(x,y)$ “ eine nachfolgende Stelle mit einem Wert „ $x+y$ “ bedient, der aus den eingehenden Stellen die Variable „ x “ mit den Werten „7“ oder „3“ und „ y “ mit dem Wert „4“ versieht. Als Ergebnis kann also „11“ oder „7“ entstehen. Es findet nur ein Schaltvorgang statt. Das Ergebnis ist hier nichtdeterministisch. Für weiterführende Informationen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. Kummer et al. 2004).

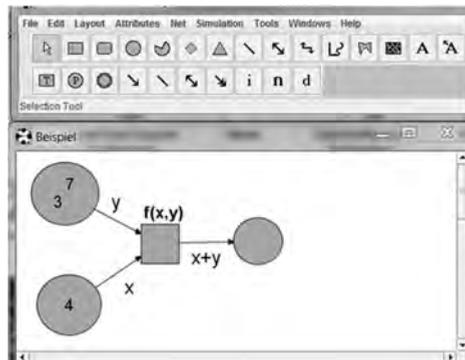


Abbildung 2: Die Petri-Netz-Simulationsumgebung

Die Entwicklungsumgebung ©renew bietet alle relevanten „Features“, um verschiedene Teilbereiche eines geschlossenen Entsorgungskreislaufes eines Müllheizkraftwerkes zu beschreiben. So können nicht nur verschiedene Petri-Netze, wie Stellen-Transitions-Netze, Bedingungs-Entscheidungs-Netze, Prädikat-Transitions-Netze, zeitbehaftete- und verschiedene Serielle-Netze modelliert und visualisiert, sondern auch in verschiedenen Modi simuliert werden. Hierbei können in einem Einzelschrittmodus oder in einer Gesamtsimulation die generierten Ergebnisse analysiert werden. Dies soll im Folgenden näher erläutert werden.

3 Simulation einer Roboterkommunikation in einem geschlossenen Stoffkreis

Gemäß Punkt (4) der Abbildung 1 soll nun exemplarisch gezeigt werden, wie durch den Einsatz von „Mess-Wiege-Systemen“ und „Greifsystemen auf KI-Basis“ in der Sortierung eine Roboterkommunikation innerhalb der Müllverbrennungsanlage erfolgen kann. In Abbildung 3 ist mit Hilfe der Petri-Netz-Simulationsumgebung ©renew der Ablauf einer Roboterkommunikation beschrieben und toolbasiert simuliert.

Als Eingabeparameter für die drei kommunizierenden Sortierroboter dienen zufällig generierte Zahlen, die als Sensor-Kennzahlen für Müllobjekte dienen. Die Höhe der Zahl soll die jeweilige Priorität für ein Aussortieren darstellen. Auf eine Darstellung der zeitlichen Reihenfolge wird im Hinblick auf die Kernelemente der Modellierung verzichtet.

Im oberen Teil der Grafik wird beschrieben, wie drei Sortierroboter auf ein gemeinsames Förderband zugreifen. Die Roboterkommunikation erfolgt über die dicken Pfeile. Die dicken Pfeile dienen in diesem Beispiel nur der Visualisierung zum besseren Verständnis und sind für die Petri-Netz-Steuerung irrelevant. Der eigentliche Kommunikationsprozess erfolgt über die dünneren Pfeile. Der reale Roboter-Greif-Ablauf wird durch ein BE-Petri-Netz (Bedingungs-Entscheidungs-Netz) im oberen Teil der Modellierung beschrieben. Ein BE-Netz enthält nur eine Steuerungsmarke vergleichbar mit einer booleschen Variablen oder eines Flags. Ein PrT-Netz enthält zudem Variablen, die für einen Steuerungsprozess relevant sind. Dies ist der Fall im unteren Teil der Grafik, wo die eigentliche Roboterkommunikation und -interaktion beschrieben wird. Sobald einer der Sortierroboter eine Steuerungsmarke in den

doppelt umrundeten Stellen erhält, bekommt er die Möglichkeit, auf das Förderband zuzugreifen, um seinen Sortiervorgang durchzuführen. Eine doppelt umrandete Stelle ist hierbei eine virtuelle Stelle, die an anderer Stelle real erscheint. So sind die virtuellen Stellen der jeweiligen Sortierroboter nichts anderes als eine redundante Kopie an der jeweiligen anderen Position des Sortierroboters. Im unteren Teil der Grafik sind die kommunizierenden Prozesse der Akteure „Sortierroboter 1“, „Sortierroboter 2“, „Sortierroboter 3“ und „Förderband“ in Form eines PrT-Petri-Netzes beschrieben. Über eine Zufallsfunktion werden den einzelnen Robotern simulierte Sensordaten von Müllobjekten zugeführt.

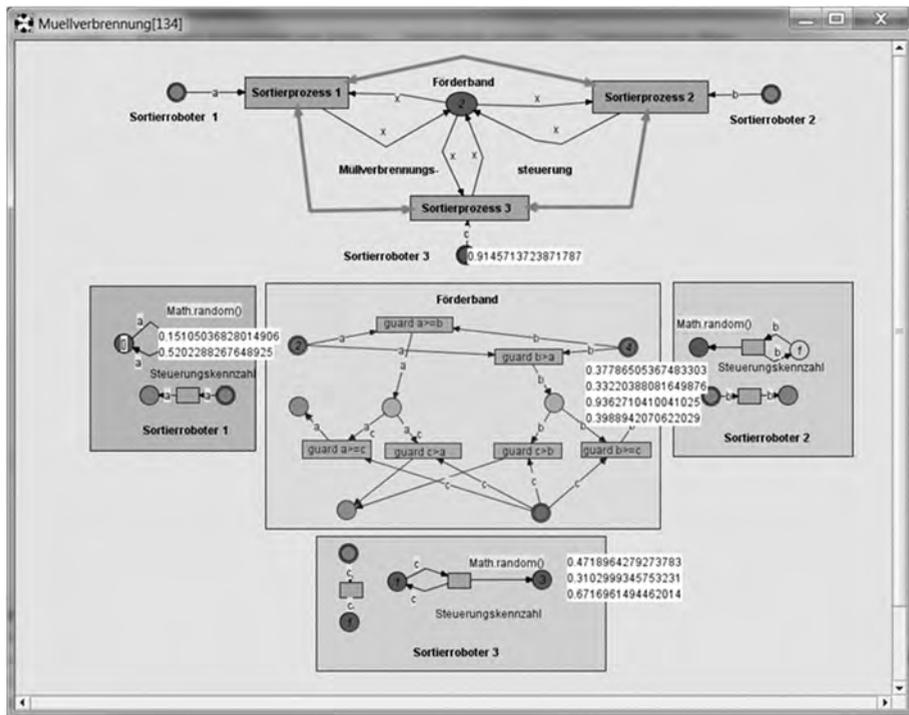


Abbildung 3: Screenshot eines Simulationslaufes bei der Roboterkommunikation

In Realität würde eine Kamera mit Bilderkennung an dem Sortierroboter die Müllobjekte identifizieren und priorisieren. Über eine gemeinsame Kommunikation über das Förderband wird dezentral entschieden, welcher Roboter den Sortierprozess durchführt. Im Gegensatz zu der bisher eingesetzten klassischen Verriegelungssteuerung können hierbei vielmehr Restriktionen berücksichtigt und implementiert werden. Auf diese Art und Weise wird neben der eigentlichen Sortier-Aufgabenerfüllung auch sichergestellt, dass sich die Roboterarme gegenseitig nicht in die Quere kommen. Die generierte Zufallszahl stellt eine kombinierte Kennzahl dar, die das Müllobjekt eindeutig katalogisiert. Diese hier zufällig erzeugten Kennzahlen sollen in Realität über Sensordaten, im Sinne einer Industrie 4.0-Steuerung, generiert werden, auf die der jeweilige Roboter zugreifen kann. In der hier aufgeführten Simulationsumgebung stellen die generierten Kennzahlen eine Art Priorisierung der Müllobjekte

dar. Vereinfacht wird hierbei davon ausgegangen, dass eine Kennzahl mit einer höheren Priorität den entsprechenden Roboter für einen ausgewählten Sortierprozess auswählt.

Abbildung 3 zeigt einen Screenshot einer zufällig gewählten Sortiersimulation einer Roboterkommunikation. Sortierroboter 1 verfügt über die Kennzahlen von zwei Müllobjekten, Roboter 2 verfügt über die Kennzahlen von 4 Müllobjekten und Roboter 3 verfügt über die Kennzahlen von 3 Müllobjekten. Nebenläufig hat Sortierroboter 3 die Sortierung eines Müllobjektes mit der Kennzahl 0.91457 zugeschrieben bekommen, denn 0.91457 ist die bisher größte Zahl (Priorität) im betrachteten Szenario in Abbildung 3. 0.91457 wird erstmalig von Sortierroboter 3 gesichtet.

4 Ergebnisse und Zusammenfassung

Im betrachteten Szenario ist exemplarisch gezeigt worden, dass Petri-Netze, insbesondere PrT-Netze, komplexe Sachverhalte einer Müll-Sortierroboter-Interaktion darstellen können. Hierbei macht es allerdings wenig Sinn, alle Details darzustellen, denn dies würde das jeweilige Petri-Netz derart überladen, dass eine entsprechende Visualisierung für das menschliche Auge zu unübersichtlich wird. Im Rahmen einer besseren Verständlichkeit und einer klareren Überschaubarkeit ist ebenfalls auf die Angabe von Zeiten in den Petri-Netzen verzichtet worden. Es ist daher im Laufe dieser Publikation vielmehr nur ein relevanter Teilbereich rausgegriffen worden, der im Rahmen einer Industrie 4.0 das (semi-)intelligente Zusammenspiel von Sortierrobotern mit Hilfe fiktiver Prioritätendaten in einem geschlossenen Müllheizkraftwerk beschreibt. Durch die Petri-Netz-Beschreibung konnte nicht nur der Ablauf visualisiert, es konnte dieser auch in einem „Debug-Mode“ simuliert werden, sodass verschiedene Szenarien tiefer beleuchtet werden konnten. Es hat sich also herausgestellt, dass eine klassische Verhandlung, wie sie bereits aus Multiagentensystemen bekannt ist (vgl. Franke 2014), über Petri-Netze simuliert werden kann. Weiterhin ist dargestellt worden, wie Argumente einer derartigen Verhandlung aussehen könnten. Dies ist durch die Vergabe von Prioritätenmarken simuliert worden, wobei jeweils zwei Sortierroboter, von insgesamt drei Robotern, wechselseitig ein Verhandlungsergebnis erzielen konnten, wenn einer der Roboter eine höhere Prioritätenmarke besitzt. Im Sinne einer Müllsortierung könnte dies z. B. der Fall sein, wenn bestimmte Müllobjekte, die über Sensoren erkannt worden sind, mit höherer Priorität ausgesucht werden sollten. Dies ist dann sinnvoll, wenn es sich z. B. um Sondermüll oder schwer verbrennbare Objekte handelt. Der Nutzen dieses Ansatzes liegt somit eindeutig darin, dass verschiedene komplexe Verhandlungsszenarien modelliert und anschließend sofort simuliert werden können. Aufgrund der Komplexität der Eingabeparameter ist nämlich ein klares Verhalten der Sortierroboter nicht eindeutig voraussagbar. Die Simulation bietet hier, auch aufgrund ihrer Visualisierungskomponenten, deutliche Vorteile. Gerade nichtdeterministisches Verhalten könnte über Simulationsprozesse besser untersucht werden. Ein nichtdeterministisches Verhalten liegt immer dann vor, wenn z. B. ein Sortierroboter mehrere Handlungsalternativen hat. Auch Fälle, wo Müllobjekte mit gleicher Priorität zu behandeln sind, würden über eine Simulation besser analysiert werden können. Simulierbar sind ebenfalls Fehlerszenarien, bei denen beispielsweise Roboter aufgrund bestimmter Konstellationen nicht einsetzbar

sind und generell ausfallen können. Als Vereinfachung sind hier ebenfalls wieder gezielt Prioritätenmarken eingesetzt worden, die zeitweise ausgewählte Roboter bewusst inaktiv lassen. Dadurch, dass die Roboter (semi-)intelligent interagieren, ist im Rahmen der Simulation auch eine Möglichkeit geschaffen worden, gewisse ungeplante „Überraschungen“ zu simulieren. So ist ebenfalls eine Situation untersucht worden, in der bei bestimmten Robotern nur bestimmte Müllobjekte zuzuordnen sind. Interessant ist zudem, dass andere Roboter durch eine gewisse „Verhandlung“ diese Aufgaben eigenständig übernommen haben. Eine deutliche Verbindung zu Industrie 4.0 ist da zu sehen, wo Teilbereiche eines produzierenden Systems -wie hier in der Müllverbrennung- eigenständig durch (semi-)intelligente Verhandlung Probleme dezentral lösen und in einen Gesamtkontext integrieren.

Damit wird erkennbar, dass Industrie 4.0 viele Ansatzpunkte im Bereich der Entsorgungslogistik hat. Roboterkooperationen gehören eindeutig in dieses Segment. Als Vorstufe und Basis einer Simulation bieten sich Petri-Netze mit den jeweiligen zugehörigen Simulationsumgebungen in sehr geeignetem Maße dazu an.

5 Fazit und Ausblick

Diese Simulationsumgebung bietet die Basis für die Forschung an verschiedenen Algorithmen und Kommunikationsmodellen für Sortierroboter. Es sollte somit exemplarisch verdeutlicht werden, wie ausgewählte Mess-, Wiege- und Greifsysteme in einer Vorsortierung einer Müllverbrennungsanlage zum Einsatz kommen. Der vernetzte KI-basierte Ansatz der Sortier- bzw. Greifroboter soll hierbei in einem übergeordneten Gesamtsystem eines Industrie-4.0-Ansatzes in der Entsorgungslogistik Verwendung finden.

Der hier untersuchte Petri-Netz-Ansatz bietet deutliche Vorteile gegenüber anderen bisherigen Ansätzen:

1. Sowohl der Materialfluss (eigentlicher Müllsortierprozess), als auch die Roboterkommunikation können in einem zusammenhängenden System beschrieben und visualisiert werden.
2. Nebenläufige Aspekte, wie asynchron ablaufende Prozesse, können anschaulich dargestellt werden.
3. Petri-Netze sind in ausgewählten Bereichen bis zu einer bestimmten Komplexität mathematisch validierbar.
4. Petri-Netz-Entwicklungsumgebungen bieten die Möglichkeit einer Simulation der Schaltvorgänge und somit der Abläufe in der Kommunikation und Interaktion der realen Sortierroboter.
5. Insbesondere mehrere gleichwertige Handlungsmöglichkeiten können über Petri-Netze visualisiert und vor allem simuliert werden.

Demgegenüber steht der Nachteil, dass Petri-Netze sehr schnell für den menschlichen Betrachter überladen und wenig überschaubar werden. Dieser Nachteil kompensiert sich aber dadurch, dass Petri-Netz-Strukturen hervorragend von Rechnern analysiert und verarbeitet werden können. Der Einsatz von Multiagentensystemen ist hierbei weiterhin im Auge zu behalten.

Abschließend soll festgehalten werden, dass der hier beschriebene Ansatz das Potenzial für tiefer greifende Untersuchungen bietet. So könnten z. B. in einem vernetzten Ansatz auch eine Kommunikation der Roboter mit anderen Teilbereichen der Müllverbrennung, wie z. B. mit dem eigentlichen Verbrennungsprozess, über Petri-Netze beschrieben und auch simuliert werden.

Literatur

- Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Verlag 2014.
- Baumgarten, B.: Petri-Netze. Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad.-Verl. 1996.
- Dutz, E.: Entsorgungslogistik. In: Bloech, J.; Ihde, G. (Hrsg.): Vahlens Großes Logistiklexikon. München 1997, S. 235-239.
- Franke, H.: Agent based environments using Petri-Net-Profiles in construction sites. 3rd Annual International Conference on Industrial, Systems and Design Engineering, Athens (Greece), 2014.
- Fortmann, K.; Kallweit, A.: Logistik. Stuttgart: Kohlhammer 2000.
- Göpfert, I.: Entsorgungslogistik. In: Klaus, P.; Krieger, W. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse; [A-Z]. 4. aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Gabler 2008, S. 154–163.
- Hausladen, I.: IT-gestützte Logistik. Systeme - Prozesse - Anwendungen. Wiesbaden: Gabler 2011.
- Heesch, S.: Entsorgung von Müll – Erzeugung durch Müll – 40 Jahre Müllheizkraftwerk Bremen, Herausgeber: swb Entsorgung GmbH, Bremen 2009.
- Huber, A.; Laverentz, K.: Logistik. München: Vahlen 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: Cortadella, J.; Reisig, W. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets 2004. 25th International Conference, ICATPN. Proceedings, volume 3099 of Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2004, S. 484-493.
- Knoch, J.: Technik der Entsorgungslogistik. In: Bloech J. (Hrsg.): Vahlens großes Logistiklexikon. München: Beck 1997, S. 239–243.
- Manzei, C.; Schlepner, L.; Heinze, R. (Hrsg.): Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Kernkonzepte, Ergebnisse, Trends. Berlin, Offenbach, Wien, Zürich: VDE Verlag GmbH, Beuth 2016.
- Piontek, J.: Bausteine des Logistikmanagements. Supply Chain Management. E-Logistics. Logistikcontrolling. Green Logistics. Logistikinstrumente. 5. Aufl. Herne: NWB Verlag 2016.
- Reisig, W.: Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien 2010.
- Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin: Springer Gabler 2016.
- Schulte, C.: Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain. 6. Aufl. München: Vahlen 2013.

Prozess-Simulation in kleinen und mittleren Unternehmen mittels des Baukastensystems *KMUSimMetall*

Process Simulation in Small and Medium-sized Enterprises with the Modular System KMUSimMetall

Steffi Rudel, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Germany),
steffi.rudel@unibw.de

Abstract: In large companies process simulation is often used in production and logistics to improve the achievement of time or cost schedules. However, in small and medium-sized enterprises (SME) in Germany, process simulation is used quite seldom. One reason is the lack of tools which support SME in using process simulation by meeting their requirements. Therefore, the modular system *KMUSimMetall* was developed. In this article, the modular system *KMUSimMetall* is introduced and examples for the usage in the daily business of SME are shown.

1 Einführung

Prozess-Simulation ist wissenschaftlich für den Bereich Produktion und Logistik seit Jahrzehnten untersucht und etabliert (z. B. Spieckermann 2005, S. 3; Rabe et al. 2008, S. 1; Wenzel et al. 2008, S. 1). Ihr Einsatz kann Unternehmen dabei unterstützen, ihre logistischen Zielgrößen zu verbessern. Die logistischen Zielgrößen benennen Nyhuis und Wiendahl (2012, S. 11) für Produktionsprozesse mit Termintreue, Durchlaufzeit, Leistung, Bestand und Kosten.

Um Unternehmen beim Einsatz der Prozess-Simulation zu unterstützen, wurden in der Vergangenheit verschiedene Instrumente entwickelt (Rabe und Hellingrath 2001, S. 117-190; Wenzel et al. 2008, S. 1). Jedoch war der Einsatz der Prozess-Simulation in der unternehmerischen Praxis in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) in Deutschland trotz der entwickelten Instrumente bis in die frühen 2000er Jahren nicht die Regel (Bös 2008, S. 409; Spieckermann 2008, S. 83). Studien zeigen den Trend, dass sich daran auch in der neueren Zeit wenig geändert hat (agiplan GmbH 2015, S. 94). Gerade im Zusammenhang mit den Entwicklungen im Bereich Industrie 4.0 gewinnt dieses Thema zusätzlich an Bedeutung, da die Simulation von Prozessen eines der Kernelemente der Digitalen Fabrik darstellt.

In der einschlägigen Fachliteratur werden mögliche Ursachen für den defizitären Einsatz der Prozess-Simulation in KMU besprochen (Bierschenk et al. 2005; Bös

2008; Dettmering et al. 2010). Dort sind Hinweise zu finden, dass die bisher entwickelten Instrumente KMU beim Einsatz der Prozess-Simulation nicht genügend unterstützen.

Es ergibt sich also die Problematik, dass ein Instrument fehlt, das die speziellen Erfordernisse von KMU aufgreift und die KMU beim Einsatz der Prozess-Simulation unterstützt. Diese Lücke soll durch die Entwicklung und Bereitstellung eines passenden Instrumentes geschlossen werden. Besonderes Augenmerk wird auf die Praxistauglichkeit des Instrumentes gelegt, weshalb eine Zusammenarbeit mit ausgewählten KMU initiiert wurde. Als Wirtschaftszweig wurde die „Herstellung von Metallerzeugnissen“ ausgewählt.

Des Weiteren wurde das Instrument der Baukastensysteme ausgewählt, da dieses Instrument nach Meinung der Autorin (basierend auf jahrelanger praktischer Erfahrung in der Simulations-Beratung) für KMU besonders geeignet ist.

Aus der Fachliteratur wurden als spezielle Erfordernisse von KMU die

- KMU-gerechte Auswahl und Ausgestaltung der Bausteine für das Baukastensystem sowie
- niedrige Anschaffungskosten für das Simulationswerkzeug identifiziert (Rudel 2016, S. 15-17).

Im Rahmen der Dissertation Rudel (2016) wurde das Baukastensystem *KMUSimMetall* entwickelt, um die Lücke zu schließen. Dieses Baukastensystem wird im vorliegenden Beitrag näher vorgestellt.

2 Vorgehensweise

Im Folgenden wird beschrieben, wie bei der Erstellung des Baukastensystems *KMUSimMetall* vorgegangen und welche Elemente verwendet wurden.

2.1 Bisher existierende Baukastensysteme

Um die oben genannte These des fehlenden Instrumentes zu stützen, wurde zunächst eine auf Wenzel (2009) basierende Untersuchung von bereits existierenden Simulationswerkzeugen durchgeführt. Aufgelistet und untersucht wurden dabei mehr als 35 Simulationswerkzeuge.

Tabelle 1: Untersuchung der Simulationswerkzeuge basierend auf Wenzel (2009)

Simulationswerkzeug	Baukastensysteme für Produktion und Logistik enthalten?	Baukastensysteme konkret auf KMU ausgerichtet?
20-sim	nein	nein
ARENA	ja	nein
AutoMod	ja	nein
AutoShed AP	nein	nein
CASTOMAT-System	nein	nein
COSA BPM	nein	nein

COSIMIR	Vertrieb eingestellt	
d3 FACT insight	ja	nein
DOSIMIS-3	ja	nein
E-CONTROL	Unternehmen aufgelöst	
Enterprise Dynamics	ja	nein
ESPE	k. A.	k. A.
FAD	Vertrieb eingestellt	
FEMOS	k. A.	k. A.
FLEXSIM	ja	nein
iGrafx	ja	nein
ISSOP	nein	nein
MASSIMO	nein	nein
MOBILEIT-S	Vertrieb eingestellt	
ModelMaker	k. A.	k. A.
PACE	nein	nein
PacSi	ja	nein
Plant Simulation	ja	nein
Powersim	nein	nein
ProModel	ja	nein
QUEST	ja	nein
Show flow	ja	nein
SimAL	ja	nein
SIMBAX	nein	nein
SimCron Modeller	ja	nein
Simflex/3D	k. A.	k. A.
SIMPLEX 3	ja	nein
SIMPRO Java Edition	Vertrieb eingestellt	
SyteAPS/AIM	Nachfolgeprodukt: nein	Nachfolgeprodukt: nein
TPS	nein	nein
UX-SIMU	Nachfolgeprodukt: nein	Nachfolgeprodukt: nein
WAY	nein	nein
WITNESS	ja	nein

Wie aus der Tabelle 1 abzulesen ist, enthielt zum Zeitpunkt der Untersuchung (06.02.-15.02.2014) keines der Simulationswerkzeuge Baukastensysteme, welche konkret für KMU in Produktion und Logistik ausgerichtet waren (s. Rudel 2016, S. 8-11).

Des Weiteren wurden einschlägige, von Anwendern in einem Simulationswerkzeug neu erstellte Baukastensysteme für Produktion und Logistik untersucht (z. B. Zelewski 1995; Voigt 2004; Heinrich und Mayer 2006; Steinhauer 2007). Auch hier

ergab sich, dass keines dieser Baukastensysteme speziell auf die Unternehmensgröße der KMU ausgerichtet war.

Abschließend wurde das neu zu erstellende Baukastensystem von dem Referenzmodell Fertigungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK (Friedland und Kühling 2000, S. 139; Rabe und Mertins 2006) sowie dem Projekt simKMU mit dem zugehörigen Simulationswerkzeug SimWebApp (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA 2011) abgegrenzt.

2.2 Erhebung der Anforderungen

Um das Baukastensystem speziell für KMU zu entwickeln, wurden die speziellen Anforderungen der KMU im Bereich Produktion und Logistik erhoben.

Zu diesem Zweck wurden zunächst Experteninterviews mit drei ausgewählten KMU des Wirtschaftszweiges „Herstellung von Metallerezeugnissen“ (Abteilung C25 des Statistischen Bundesamtes) durchgeführt, wobei als Erhebungsinstrument das Leitfadenterview genutzt wurde. Hierbei wurden die „Anforderungen aus der Praxis der KMU“ erhoben.

Des Weiteren wurde die einschlägige Fachliteratur zum Einsatz der Prozess-Simulation in KMU systematisch ausgewertet und die „Anforderungen aus der Fachliteratur“ erarbeitet. Die Anforderungen aus der Praxis sowie die Anforderungen aus der Fachliteratur wurden in einen Anforderungskatalog überführt, der schlussendlich 39 Anforderungen enthielt (Rudel 2016, S. 84-85).

Auf Basis dieses Anforderungskataloges wurde das Baukastensystem *KMUSimMetall* entwickelt.

2.3 Beteiligte Software-Programme

Das Baukastensystem *KMUSimMetall* arbeitet mit der Business-Software Microsoft Excel und dem Simulationswerkzeug PACE. Die beiden Software-Programme sind mittels einer Datenschnittstelle gekoppelt, über die sie miteinander kommunizieren. Für die Ein- und Ausgabe von Daten durch den Anwender wird Excel genutzt, da diese Software in KMU einen „Quasi-Standard“ für den Austausch und die Verarbeitung betriebswirtschaftlich relevanter Daten darstellt.

2.4 Modellierungssprache Petri-Netze

Die Prozess-Simulation erfolgt in PACE auf der Grundlage von Petri-Netzen. Obwohl Petri-Netze in der Informatik und in der Wirtschaftsinformatik seit Langem intensiv genutzt werden, um Prozesse zu modellieren und zu analysieren (siehe <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/index.php>), wurden sie bislang in betriebswirtschaftlichen Anwendungskontexten kaum beachtet. Daher stellt das Baukastensystem *KMUSimMetall* einen innovativen Ansatz dar, der darauf abzielt, Modellierungskonzepte und -sprachen sowie darauf basierende Software-Werkzeuge, die sich im Bereich der Informatik und Wirtschaftsinformatik bereits bewährt haben, für die betriebliche Praxis – insbesondere für KMU – zu erschließen.

Der Vorteil, den Petri-Netze gegenüber anderen Modellierungssprachen insbesondere für den Bereich Produktion und Logistik bieten, ist die Simulation auf der Ebene von

Stückgütern. Petri-Netze eignen sich daher hervorragend für die diskrete Simulation, wie sie im Bereich der Produktion und Logistik verbreitet ist.

Die höheren Petri-Netze, wie sie in PACE verwendet werden, erlauben weiterhin eine Attributierung der einzelnen „Marken“ (so werden die Stückgüter, die durch die Produktion laufen, in der Fachsprache der Petri-Netze genannt). Das heißt, dass bestimmt Eigenschaften zu jedem Zeitpunkt der Simulation von jeder Marke abgefragt werden können. So kann beispielsweise genau nachvollzogen werden, wie lange welche Marke auf welcher Bearbeitungsstation bearbeitet wurde oder wie lange die Wartezeiten vor der Bearbeitung waren. Schwankungen in der Bearbeitungszeit können tatsächlich pro Marke stochastisch verteilt in die Simulation eingebracht werden.

Ein weiterer Vorteil, den Petri-Netze gegenüber anderen Modellierungssprachen bieten, ist die geringe Anzahl von Elementen der graphischen Notation: So kann theoretisch jedes Simulationsmodell aus den nur vier Netzelementen *Stellen*, *Transitionen*, (*gerichtete*) *Kanten* und *Marken* modelliert werden (zur Hierarchisierung können bei den höheren Petri-Netzen optional als fünftes Netzelement *Module* verwendet werden). Daher werden die Petri-Netze von vielen Autoren als einfach bzw. leicht erlernbar angesehen. Auch die Autorin hält Petri-Netze insbesondere für neue und unerfahrene Anwender im Bereich der Prozess-Simulation für besonders geeignet.

Abschließend soll noch auf die mathematisch fundierte Definition, die den Petri-Netzen zugrunde liegt, hingewiesen werden. So können die Simulationsmodelle beispielsweise auf Lebendigkeit oder Deadlocks überprüft werden (Wu 2005; Kahloul et al. 2014).

3 Das Baukastensystem *KMUSimMetall*

Das Baukastensystem *KMUSimMetall* besteht aus verschiedenen Elementen, welche aus Gründen der Anwenderfreundlichkeit in einer Zip-Datei verpackt werden.

In der Vorbereitungsphase wird nach dem Entpacken der Zip-Datei zunächst das Simulationswerkzeug PACE auf dem Rechner des Anwenders installiert und der ebenfalls in der Zip-Datei enthaltene Basisbaustein hinzugeladen. In diesem Basisbaustein ist ein fertiges Simulationsmodell mit den gängigsten Bearbeitungsstationen eines typischen KMU des Wirtschaftszweigs „Herstellung von Metallerzeugnissen“ (CNC-Drehmaschinen, CNC-Fräsmaschinen, CNC-Dreh-Fräszentren, Manuelle Drehmaschinen, Manuelle Fräsmaschinen, Manuelle Bohrmaschinen, Manuelle Schleifmaschinen, Montage-Arbeitsplätze, Gleitschleifmaschinen, Prüfplätze, Externe Bearbeitung) bereits enthalten. Diese Bearbeitungsstationen können anschließend für das jeweilige Unternehmen in Art und Anzahl individuell angepasst werden.

Die folgende Abbildung 1 zeigt beispielhaft die oberste hierarchische Ebene eines so erstellten Simulationsmodells in PACE. Die oben beschriebenen Bearbeitungsstationen sind im Modul Maschinenpark (auf einer hierarchisch untergeordneten Ebene) enthalten.

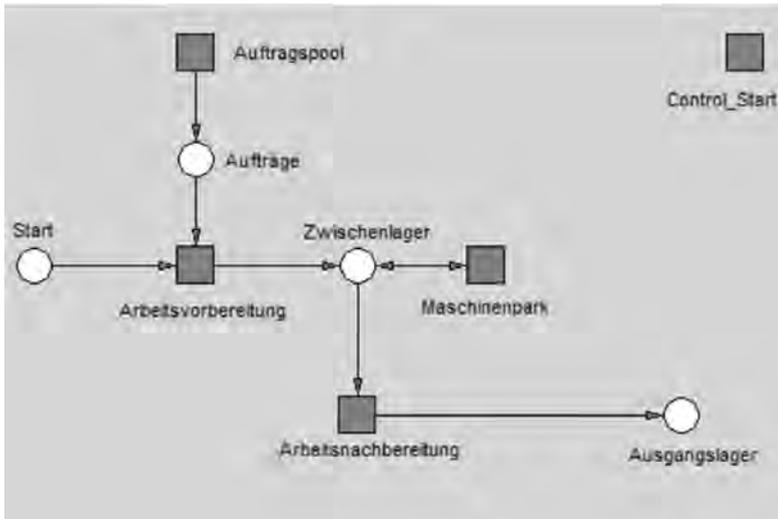


Abbildung 1: Ansicht für den Anwender aus PACE: oberste hierarchische Ebene

Die Eingabe von Daten durch den Anwender erfolgt anschließend in der Excel-Datei, welche mehrere, anwenderfreundlich gestaltete Tabellenblätter enthält. Nach Eingabe der entsprechenden Produktionsaufträge in Excel wird in PACE ein Simulationslauf gestartet. Im Simulationsmodell in PACE ist hinterlegt, dass die entsprechend benötigten Daten wie z. B. Bearbeitungsstationen, Losgrößen oder Startzeitpunkt aus Excel abgerufen werden. Nach dem Simulationslauf werden die Ergebnisse von PACE über die Datenschnittstelle zurück in die Excel-Datei geschrieben, wo sie vom Anwender abgelesen und anschließend interpretiert werden können. Für eine genauere Beschreibung der Excel-Datei sowie weitere Abbildungen siehe Rudel (2016, S. 111-122).

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus einem der Excel-Tabellenblätter. Dort kann nach dem Simulationslauf abgelesen werden, wann die eingeplanten Lose tatsächlich fertiggestellt sein werden und auf welcher Station sich welches Los wann befindet.

ID	Start Auftrag	Start Auftrag	Fertig-	Fertig-	Produktionsplanung			
	SOLL	IST	stellung	stellung	Station 1	Start auf	Station 2	Start auf
			SOLL	IST		Station	Station	Station
1	12.01.15	12.01.15	27.01.15	20.01.15	cncDreh	12.01.15	cncFräß	12.01.15
2	16.01.15	16.01.15	02.02.15	26.01.15	cncDreh	16.01.15	cncFräß	16.01.15
3	27.01.15	27.01.15	11.02.15	04.02.15	cncDreh	27.01.15	cncFräß	27.01.15
4	29.01.15	29.01.15	13.02.15	06.02.15	cncDreh	29.01.15	cncFräß	29.01.15
5	06.02.15	06.02.15	23.02.15	16.02.15	cncDreh	06.02.15	cncFräß	06.02.15
6	12.02.15	12.02.15	27.02.15	20.02.15	cncDreh	12.02.15	cncFräß	12.02.15
7	24.02.15	24.02.15	11.03.15	04.03.15	cncDreh	24.02.15	cncFräß	24.02.15
8	27.02.15	27.02.15	16.03.15	09.03.15	cncDreh	27.02.15	cncFräß	27.02.15
9	12.03.15	12.03.15	27.03.15	20.03.15	cncDreh	12.03.15	cncFräß	12.03.15
10	20.03.15	20.03.15	08.04.15	30.03.15	cncDreh	20.03.15	cncFräß	20.03.15
11	24.03.15	24.03.15	10.04.15	01.04.15	cncDreh	24.03.15	cncFräß	24.03.15

Abbildung 2: Ausschnitt aus dem Excel-Tabellenblatt Ergebnisse_Aufträge

In der Abbildung 3 ist ein Ausschnitt eines weiteren Excel-Tabellenblattes zu sehen. Aus diesem Tabellenblatt kann nach dem Simulationslauf die tatsächliche Auslastung der Bearbeitungsstationen direkt abgelesen werden.

Kategorie Bearbeitungsstation	Bearbeitungszeit		Wartezeit		Anzahl
	Zeit (Min.)	in %	Zeit (Min.)	in %	
cncDreh	3041,6 Min.	1,7 %	175887,2 Min.	98,1 %	4
cncFräß	5700,0 Min.	4,3 %	128496,6 Min.	95,6 %	3
cncDrehFräß	0,0 Min.	0,0 %	44827,2 Min.	100,0 %	1
manDreh					0
manFräß					0
manBohr	11450,2 Min.	12,8 %	78109,2 Min.	87,2 %	2
manSchleif	0,0 Min.	0,0 %	44827,2 Min.	100,0 %	1
gleitSchleif			87374,4 Min.	97,5 %	2
montage	15147,2 Min.	16,9 %	74222,2 Min.	82,8 %	2
prüf	1141,0 Min.	2,6 %	43686,2 Min.	97,5 %	1
extern			26587,2 Min.	59,4 %	1

Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Excel-Tabellenblatt *Ergebnisse_Stationen*

In der Dissertation wird das Vorgehen zum Erstellen eines Simulationsmodelles, zur Durchführung der Simulationsläufe sowie zur Auswertung der Daten genauer erläutert (Rudel 2016, S. 129-154).

Um die Anwendung des Instrumentes möglichst einfach zu gestalten, ist der Zip-Datei ein Nutzerhandbuch beigelegt. Dieses beschreibt auf 29 Seiten Schritt für Schritt in der Sprache des Anwenders

- den Aufbau und die Bestandteile des Baukastensystems,
- die Vorbereitungen zur Nutzung des Baukastensystems,
- die Durchführung eines Simulationslaufes sowie
- die Anpassung des Baukastensystems an das eigene Unternehmen.

4 Mögliche Anwendungsbeispiele

Mit dem Baukastensystem *KMUSimMetall* können typische Fragestellungen, wie sie in einem KMU des Wirtschaftszweigs „Herstellung von Metallerzeugnissen“ vorkommen, direkt beantwortet werden. So können beispielsweise die Auslastung von Bearbeitungsstationen, Fertigstellungstermine von Aufträgen oder auch Schwankungen von Rüstzeiten untersucht werden.

In Abbildung 3 ist beispielsweise zu sehen, dass die Wartezeiten der verschiedenen Bearbeitungsstationen recht hoch sind – die Produktion scheint auf den ersten Blick also noch Kapazitäten frei zu haben.

In dem Beitrag Rudel et al. (2017) werden zwei typische Fragestellungen, wie sie in KMU auftreten können, mit Hilfe des Baukastensystems *KMUSimMetall* aufgegriffen. Dort geht es zum einen um die Fragestellung, ob ein Mitarbeiter an einem bestimmten Tag einen Gleittag nehmen kann (der Mitarbeiter ist für die Qualitätssicherung zuständig, und es wird mit Hilfe des Baukastensystems geprüft, ob an dem betreffenden Tag eine Qualitätsprüfung ansteht). Zum anderen wird die Frage

aufgegriffen, wie hoch die Auslastung der einzelnen Bearbeitungsstationen im Unternehmen ist.

Im vorliegenden Beitrag werden stellvertretend zwei weitere Fragestellungen herausgegriffen, um mögliche Anwendungen des Baukastensystems *KMUSimMetall* aufzuzeigen.

4.1 Basisbefüllung für die Anwendungsbeispiele

Im vorliegenden Beispiel wird von einer Lohnfertigung ausgegangen, bei der ein Unternehmen Spezialteile (Halterungen) für einen Hersteller von Kamerastativen fertigt. Daher erhält das Unternehmen den gleichen Auftrag von einem Auftraggeber immer wieder in unregelmäßigen Abständen in einer gleichbleibenden Stückzahl von 200 Teilen und bearbeitet diese. Für die Aufträge wird von dem Unternehmen jeweils eine Fertigstellung nach 10 Werktagen ab Teileanlieferung durch den Auftraggeber zugesagt (Rudel 2016, S. 137). Die Bearbeitung wird zunächst unternehmensintern auf der CNC-Drehmaschine, der CNC-Fräsmaschine, der manuellen Bohrmaschine und der Gleitschleifmaschine bearbeitet. Danach werden die Teile zur externen Bearbeitung außer Haus gegeben und abschließend wieder unternehmensintern montiert (Rudel 2016, S. 138).

Diese Daten sowie weitere Informationen (wie beispielsweise tägliche Betriebszeiten) werden in der Excel-Datei erfasst.

4.2 Anwendungsbeispiel: Fertigstellungstermin eines Auftrags

Bei dieser Fragestellung wird untersucht, ob ein Auftrag ausnahmsweise bereits vor dem zugesagten Fertigstellungstermin (10 Tage ab Teileanlieferung durch den Auftraggeber, siehe oben) vom Auftraggeber abgeholt werden kann. Grund dafür ist ein Engpass in der Produktion des Auftraggebers.

Um diese Fragestellung zu beantworten, wird der Fertigungsplan in der Excel-Datei hinterlegt und anschließend ein Simulationslauf in PACE gestartet. Nach Abschluss des Simulationslaufes wird wiederum die Excel-Datei, in das PACE die Ergebnisse der Simulation schreibt, geprüft.

Anhand der Simulationsergebnisse kann abgelesen werden, wann der Auftrag laut der Simulation fertiggestellt sein wird. Sollte dieser Termin vor dem angefragten Fertigstellungstermin liegen, kann der Auftrag ausnahmsweise früher vom Auftraggeber abgeholt werden.

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt, wie das Baukastensystem KMU bei kurzfristigen Änderungsanfragen bezüglich der Produktionsplanung unterstützen kann.

4.3 Anwendungsbeispiel: Zusätzlicher Auftrag

Bei dieser Fragestellung wird hinterfragt, ob ein zusätzlicher Auftrag angenommen werden kann, ohne dass sich die zugesagten Fertigstellungstermine der anderen, bereits eingeplanten Aufträge verschieben.

Um diese Fragestellung beantworten zu können, wird wiederum der Fertigungsplan der bereits eingeplanten Aufträge in der Excel-Datei hinterlegt. Anschließend wird

ein Simulationslauf durchgeführt und die Excel-Datei mit den von PACE eingetragenen Ergebnissen unter einem anderen Namen gespeichert.

Anschließend wird die Excel-Datei um den zusätzlichen Auftrag ergänzt und erneut ein Simulationslauf durchgeführt. Durch den Vergleich der so erzeugten Simulationsergebnisse in Excel mit der zuvor gespeicherten Excel-Datei sind die Auswirkungen des zusätzlichen Auftrages im Detail ablesbar.

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt auf, wie mit Hilfe des Baukastensystems die Auswirkungen eines zusätzlichen Auftrages auf die Produktionsplanung geprüft werden kann. So können beispielsweise Verschiebungen von Fertigstellungsterminen oder auch Veränderungen in der Auslastung der Maschinen aufgezeigt werden.

5 Aktueller Stand und Ausblick

Mit dem Baukastensystem *KMUSimMetall* wurde ein Instrument speziell für KMU geschaffen, um diese beim Einsatz der Prozess-Simulation zu unterstützen. Das Baukastensystem wird interessierten Unternehmen kostenfrei zur Verfügung gestellt. Damit kann das Baukastensystem einen wichtigen Beitrag leisten, die KMU in Deutschland bei der Digitalisierung der Industrie zu unterstützen. Im nächsten Schritt ist geplant, das Baukastensystem im Rahmen von weiteren Fallstudien in der Praxis der Unternehmen zu testen. Hierzu sind ab Herbst 2017 Studentarbeiten an der Fakultät für Informatik der Universität der Bundeswehr München in Zusammenarbeit mit Praxispartnern geplant. Sollte sich das Baukastensystem in der Praxis der Unternehmen bewähren, ist ab 2018 die Weiterentwicklung (beispielsweise durch die Erweiterung um neue Funktionen sowie die Anpassung auf andere Wirtschaftszweige) geplant.

Literatur

- agiplan GmbH (Hrsg.): Erschließung der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Mülheim an der Ruhr: agiplan GmbH, Fraunhofer IML, ZENIT GmbH 2015.
- Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.; Ritter, A.: Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen: Auswertung einer Breitenbefragung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.
- 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 Verlag 2008, S. 407-415.
- Dettmering, H.; Naß, A.; Reiter, R.: Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik für den Mittelstand. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 5, S. 489-493.
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) (Hrsg.): Abschlussbericht *simKMU – Internet- und webbasierte Simulationsdienste: Forschungsergebnisse im Teilvorhaben „Grundlagen, Konzeption und Intralogistik“ des Verbundprojekts simKMU*. Stuttgart: Fraunhofer IPA 2011.
- Friedland, R.; Kühling, M.: Referenzmodell für Fertigungssysteme. In: Wenzel, S. (Hrsg.): *Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. Ghent: SCS-Europe BVBA 2000, S. 133-150.

- Heinrich, S.; Mayer, G.: Ablaufsimulation im VDA – Ein Bericht aus der Arbeitsgruppe.. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik, Tagungsband zur 12. ASIM-Fachtagung. San Diego: SCS Publishing House, 2006, S. 423-428.
- Kahloul, L.; Bourekkache, S.; Djouani, K.; Chaoui, A.; Kazar, O.: Using High Level Petri Nets in the Modelling, Simulation and Verification of Reconfigurable Manufacturing Systems. *International Journal of Software Engineering & Knowledge Engineering* 24 (2014) 3, S. 419-443.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. Berlin: Springer 2012.
- Rabe, M.; Hellingrath, B. (Hrsg.): *Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik: Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen*. San Diego: SCS International 2001.
- Rabe, M.; Mertins, K.: *Fraunhofer Simulation Reference Models*. In: Bernus, P.; Mertins, K.; Schmidt, G. (Hrsg.): *Handbook of Architectures of Information Systems*. Berlin: Springer 2006, S. 693-704.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin: Springer 2008.
- Rudel, S.: *Prozess-Simulation in KMU: Entwicklung und Analyse eines Petrinetz-basierten Baukastensystems als Instrument zur Modellierung und Simulation von Produktions- und Logistikprozessen – speziell ausgelegt zur Unterstützung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)*. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2016.
- Rudel, S.; Schimmel, M.; Zelewski, S.: *Prozess-Simulation in kleinen und mittleren Unternehmen*. *productivITy* (2017) 1, S. 31-33.
- Spieckermann, S.: *Diskrete, ereignisorientierte Simulation in Produktion und Logistik – Herausforderungen und Trends*. In: Schulze, T.; Hoton, G.; Preim, B.; Schlechtweg, S. (Hrsg.): *Simulation und Visualisierung 2005 – SimVis*. Erlangen: SCS Publishing House 2005, S. 3-14.
- Spieckermann, S.: *Durchgängige Planungsbegleitung mit Simulation im Mittelstand*. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (2008) 1-2, S. 83-85.
- Steinhauer, D.: *Simulation im Schiffbau und Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar*. In: Franz, V. (Hrsg.): *Simulation in der Bauwirtschaft*. Kassel: Kassel University Press 2007, S. 1-13.
- Voigt, T.: *Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- Wenzel, S.: *Modellbildung und Simulation in Produktion und Logistik – Stand und Perspektiven*. In: Elst, G. (Hrsg.): *Tagungsband zum ASIM-Treffen STS/GMMS 2009*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009, S. 7-16.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin: Springer 2008.
- Wu, Z.M.: *Modelling and simulation of an intelligent flexible manufacturing system via high-level object Petri nets (HLOPN)*. In: *International Journal of Production Research* 43 (2005) 7, S. 1443-1463.
- Zelewski, S.: *Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme: Band 5.1: Einführung in Synthetische Netze – Das Kernkonzept Synthetischer Netze*. Leipzig, Universität Leipzig, Institut für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft, 1995.

Einführung von offenen Standards in der Ablaufsimulation am Beispiel der Schnittstelle Layout-Fördertechnikplanung

Introducing Open Standards to Material Flow Simulation

Gottfried Mayer, Marielouise Mieschner, BMW AG, München (Germany),
gottfried.mayer@bmw.de, marielouise.mieschner@bmw.de

Abstract: The quality of material flow simulation results depends on the quality of the used input data. Therefore it is important to import complex data via an automated interface to avoid mistakes. AutomationML is an open data exchange format that can be used to hand over data from different fields of the digital factory. This article describes the data exchange from CAD conveyor planning to the material flow simulation by using AutomationML.

1 Motivation

Daten sind der Grundstein jeder Ablaufsimulation. Um homogen auf Planungsdaten zugreifen zu können, sind in der Vergangenheit diverse Schnittstellen zwischen den Datenbasen und den Simulationssystemen entstanden. Meist wurden hier proprietäre Datenformate zum Austausch gewählt, die exakt die zu übergebenden Daten abbilden. Das hat den Vorteil, dass die Dateien klein sind. Es hat aber den Nachteil, dass die Schnittstelle ausschließlich für den gewählten Anwendungsfall funktioniert. Muss das Datenmodell geändert oder erweitert werden, ist dies meist schwierig, da sowohl das abgebende als auch das aufnehmende System geändert werden müssen.

Diese Lücke versucht das AutomationML-Konsortium zu schließen (vgl. AutomationML 2017). Der Ansatz, verschiedene standardisierte Datenformate zu einem Austauschformat für die Daten der Automatisierungstechnik zusammenzufassen, scheint auch für die digitale Fabrik hilfreich zu sein (vgl. Drath 2010). Um dies für die Automobilindustrie zu überprüfen und zu strukturieren, wurde innerhalb des VDA-Arbeitskreises *Digitale Fabrik* die Projektgruppe *AutomationML* gegründet (VDA: Verband der Automobilindustrie). Ziel dieser Gruppe ist es, eine VDA-Empfehlung zu erarbeiten, die die Rahmenbedingungen absteckt, sodass AutomationML (AML) projektübergreifend eingesetzt werden kann. Um die erarbeiteten Theorien zu überprüfen, wurde beschlossen, die Schnittstelle GSL-FT (Generische Simulationslösung – Fördertechnik) (vgl. Jörg und Wacker 2008)

zwischen der Layout-Fördertechnikplanung und der Ablaufsimulation in AML zu migrieren.



Abbildung 1: *Proprietäre Schnittstelle GSL-FT*

Diese GSL-FT-Schnittstelle (Abb. 1) wurde geschaffen, um den Simulationsexperten das Nachbauen und Parametrisieren des Fördertechniklayouts im Simulationswerkzeug zu ersparen und dies zu automatisieren. Hierzu muss im Quellsystem, in diesem Fall MicroStation mit den TriCAD Fördertechnikmodulen, das vorhandene Fördertechniklayout um die Flussrichtung erweitert werden. Ist diese vollständig, wird eine XML-Datei (XML: extensible Markup Language) erzeugt, die die Art der Fördertechnik, deren Koordinaten, Geschwindigkeiten, Vorgänger und Nachfolger sowie Verfügbarkeitsdefinitionen der Komponenten beinhaltet.

Diese Daten können nun direkt in ein Modell überführt oder über eine Zwischenoberfläche (GSL-FT-Modul im Simulationsassistenzsystem SimAssist) nochmals bearbeitet bzw. verifiziert und validiert werden (zur Verifikation und Validierung vgl. Rabe 2008) werden. Der Zwischenschritt dient dazu, um bekannte Daten, die im Quellsystem nicht vorhanden sind, wie z. B. spezielle Bahngeschwindigkeiten, noch vor dem Erzeugen des Modells hinzufügen zu können.

Diese Schnittstelle wurde im Jahr 2009 von den VDA-Arbeitsgruppen *Ablaufsimulation* und *Digitale Fabrikplanung* definiert, eingeführt und ist seitdem benutzbar. Da in den Daten die Struktur der Fördertechnik auslesbar ist, kam in den letzten Jahren immer mehr Interesse an diesen auf. Als Beispiel sei hier die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) zu nennen. In der VIBN werden die Programme für die Steuerung der Anlagen vorab getestet. Dafür muss die komplette Anlage inklusive deren Sensorik abgebildet werden. Es wurden Versuche gemacht, hier auch die GSL-FT-Schnittstelle als Basis zu verwenden. Die ersten Ergebnisse waren vielversprechend; es gibt aber weiteren Bedarf, das Datenformat um Informationen zu erweitern, wie z. B. die geometrische Darstellung der Objekte.

Nach reichlicher Diskussion und Überlegung wurde beschlossen, das vorhandene GSL-FT-Format nicht zu erweitern, sondern die Schnittstelle in AML zu überführen. Neben der einfacheren Erweiterbarkeit, die durch das Format selbst gegeben (siehe Abschnitt 2) ist, war auch die weitere Verwendbarkeit (Abb. 2) eine ausschlaggebende Begründung für diese Entscheidung.

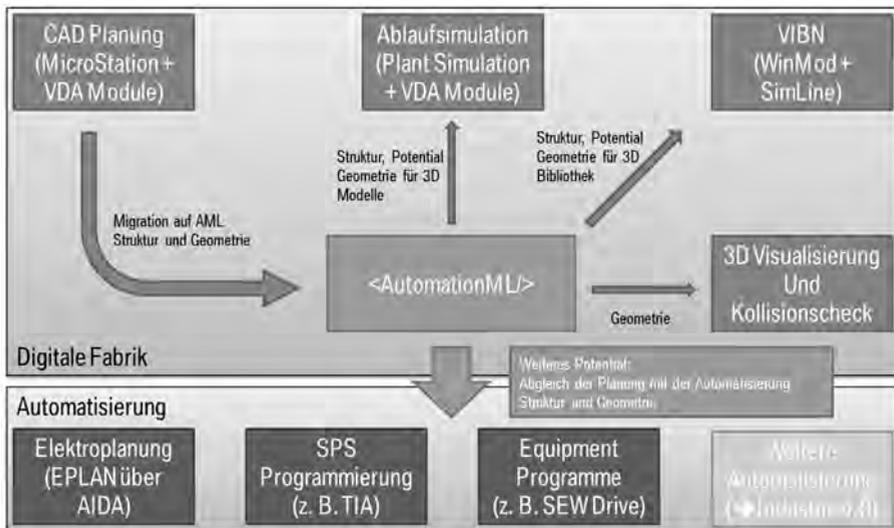


Abbildung 2: Verwendbarkeit der neuen Schnittstelle

Durch die Erweiterung des Datenaustauschformates um die 3D-Geometrie entsteht für die Ablaufsimulation die Möglichkeit, direkt aus der Schnittstelle heraus dreidimensionale Modelle zu erstellen. Genau dieselbe Datenbasis wird dann für die virtuelle Inbetriebnahme verwendet, um dort die Sensorik-Modelle zu erstellen. Ein weiterer Anwendungspunkt aus der digitalen Fabrik ist dann noch die 3D-Visualisierung inklusive Kollisionscheck, für die diese Daten direkt weiterverwendet werden können.

Ein zusätzliches Potenzialfeld für die Fördertechnikdaten im AML-Format sind die Themen der Automatisierung. Um z. B. ein SPS-Programm (SPS: speicherprogrammierbare Steuerung) für die Anlage erstellen zu können, benötigt man die Konfiguration der Hardware, die beschreibt, welches Equipment vorhanden ist. Dies kann aus der AML-Datei ausgelesen und weiterverwendet werden. Das gleiche gilt für die Planung der Elektroinstallation oder die Programmierung des Equipments selbst.

2 Aufbau AML

AML ist keine komplett neue Erfindung eines Datenformates. Vielmehr wurde hier auf vorhandene Standardformate zurückgegriffen, die auf XML basieren. Kernstück bildet das Dateiformat CAEX (Computer Aided Engineering Exchange), ein Format zur Speicherung und Darstellung von hierarchischen Strukturen.

In AML werden vier Strukturen unterschieden:

Die *Rollenklassenbibliothek* dient dazu, eine Sammlung an Objekten definieren zu können und diese auch voneinander abzuleiten. Der AML-Verein stellt eine Bibliothekssammlung (vgl. AutomationML 2017) zur Verfügung, die beliebig erweitert werden kann. Wichtig ist dabei, dass Bezüge zu den Basisklassen hergestellt werden.

Die *Schnittstellenklassenbibliothek* definiert Schnittstellen innerhalb der AML-Datei sowie externe Verweise.

Die *Systemklassenbibliothek* dient dazu, spezielle Ableitungen aus den Rollenklassen zu definieren und für die eigene Verwendung anzupassen. Hier können zusätzliche hersteller- oder anwenderspezifische Daten ergänzt werden.

In der *Instanzenhierarchie* werden final die einzelnen Objekte beschrieben. Diese müssen von den Klassenbibliotheken abgeleitet sein und repräsentieren die realen Objekte mit deren Eigenschaften.

Diese Struktur findet sich in allen AML-Dateien wieder und kann durch externe Definitionen erweitert werden. Diese externen Anhänge werden über definierte Schnittstellen angebunden (Schnittstellenklassenbibliothek). Aktuell werden hier Collada (vgl. Collada 2017) zur Beschreibung von Geometrie und Kinematik sowie PLCopen XML (vgl. PLCopen 2017) zur Verhaltensbeschreibung, genutzt.

3 VDA-Empfehlung

Da in offenen Formaten die Strukturen nicht fest definiert sein können, trat die Frage auf, wer definiert für die einzelnen Anwendungen die Struktur innerhalb von AML. Da eine solche Definition jegliche Software betrifft, die das Format später lesen oder schreiben können soll, wurde innerhalb des VDA-Arbeitskreises *Digitale Fabrik* eine Projektgruppe gegründet, die dieser Problematik nachgeht.

Bei der Betrachtung, welche Inhalte firmenübergreifend definiert werden sollen, wurde schnell klar, dass für diese Umfänge eine VDA-Empfehlung nötig sein wird. Diese ist aktuell noch in Abstimmung und wird unter der VDA-Empfehlungsnummer 4813 erscheinen.

Für die Standardisierung des Austauschs sind mehrere Schritte nötig:

Als erster Schritt wurde festgelegt, die oberste Ebene der Instanzen mit der Firmenkennung (Klasse Enterprise) zu versehen. Dies dient der eindeutigen Zuordnung der Daten zu einer Firma.

Unter diesem Hauptknoten erfolgt die Aufteilung nach Produkt (Stückliste, bill of materials, BOM), Prozess (bill of process, BOP) und Ressourcen (bill of equipment, BOE). Da sich die Ablaufsimulation derzeit ausschließlich aus der Ressourcenliste bedient, wird hier auf eine Detaillierung der anderen beiden Bäume verzichtet.

Bei der Festlegung des Ressourcenbaums wurde beschlossen, sich an die internationale Norm IEC 62264-1 anzulehnen. Abbildung 3 zeigt auf der linken Seite die Einteilung nach IEC, auf der rechten Seite die Ableitung für die VDA-Empfehlung. Die Struktur des Baumes ist sehr schlank gehalten und kann bei Bedarf über Gruppen auf den betreffenden Ebenen ergänzt werden.

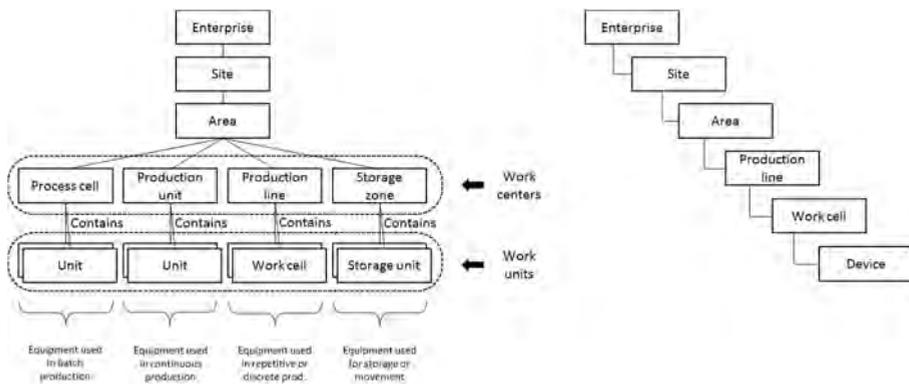


Abbildung 3: Struktur gemäß IEC 62264-1

Im nächsten Schritt wurden nun die Bibliotheken (Rollen, Interfaces), die Zuweisung der Attribute (Attributsemantikliste) und der Objekte (Objektsemantikliste) sowie die Interfacesemantikliste definiert. Diese Schritte sind in Abschnitt 4 beschrieben.

Mit Hilfe dieser VDA-Empfehlung soll es ermöglicht werden, beliebige Daten zwischen den Disziplinen der digitalen Fabrik auszutauschen.

4 Umbau der GSL-FT-Schnittstelle

Um die Definitionen der VDA-Empfehlung validieren zu können, wurde innerhalb der VDA-Projektgruppe *AutomationML* beschlossen, dass die festgelegten Punkte anhand von bereits vorhandenen Schnittstellen getestet werden. Dafür wurde u. a. die GSL-FT-Schnittstelle ausgewählt, da bei dieser sowohl abgebende als auch aufnehmende Schnittstellen in der Verantwortung einer VDA-Arbeitsgruppe liegen. Des Weiteren lagen schon im Vorfeld Anfragen von anderen Disziplinen der digitalen Fabrik vor, die die Daten der Fördertechnik nutzen möchten. Ein Beispiel ist die Modellerstellung für die virtuelle Inbetriebnahme (vgl. Abb. 2).

Um die bereits vorhandene proprietäre Schnittstelle migrieren zu können, wurden im ersten Schritt die Klassen der Rollenklassenbibliothek definiert. Dabei wurde versucht, auf vorhandene Bibliotheken des AML-Vereins aufzusetzen (Abb. 4). Da die Objekte in GSL-FT bereits definiert waren, wurde hier eine 1:1-Umsetzung in AML-Rollen gewählt und diese von den AML-Basisklassen abgeleitet.

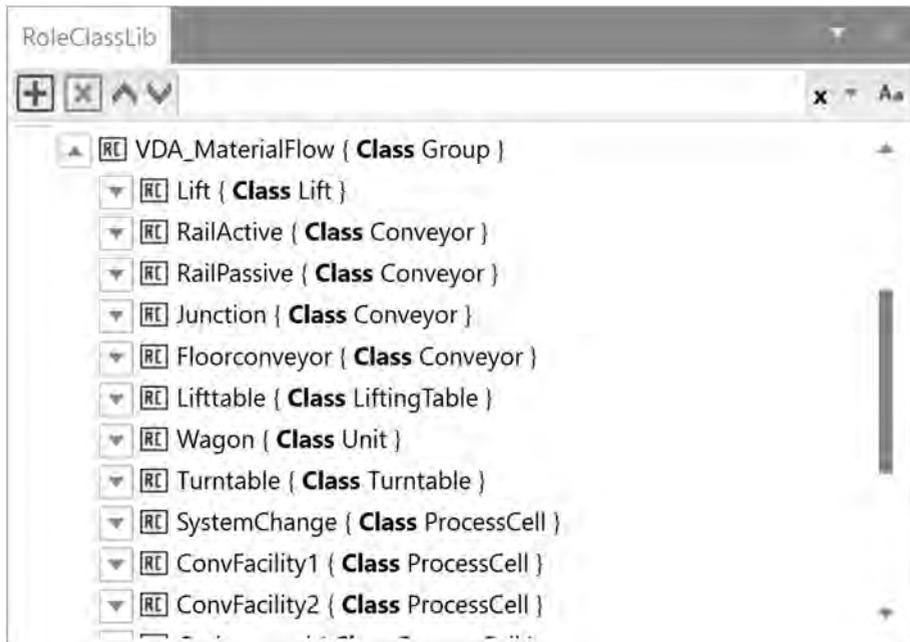


Abbildung 4: Die VDA-Rollenklassenbibliothek

Im nächsten Schritt wurde eine Datei für das Mapping der möglichen Attribute erstellt. Dies ist notwendig, da die Namen der Eigenschaften nicht normiert sind und somit ein und derselbe Wert unterschiedliche Namen in den Systemen haben kann. Das können zum einen einfache Spracheinstellungen sein (z. B. Verfügbarkeit und Availability), zum andern aber generische, nicht selbstsprechende Werte (z. B. Verfügbarkeit und Value_17). Um diese Problem lösen zu können, wurden eindeutige Bezeichnungen für alle Attribute definiert. Diese Definition wurde an den eCI@ss-Standard angelehnt (vgl. eCI@ss 2017). Als Präfix wurden hier die Zeichenfolge „VDA“ gewählt, um die Attribute eindeutig zuweisen zu können. Ebenso wurde eine Versionierung für Attributnamen eingeführt, die durch die hinteren Zahlen des Namens definiert sind (vgl. Abb. 5, Spalte 1).

Bezeichnung VDA	Beispieldaten	Typ	Einheit	Beschreibung	Attributname GSL-FT
VDA#02-Y000CA#001	Erlang	string		Formbeschreibung für Simulation	mtbf_parameter
VDA#02-Y000CB#001	NegExp	string		Formbeschreibung für Simulation	mttr_parameter
VDA#02-Y000CC#001	1.123	double		X- Koordinate des Startpunktes	Startpoint X
VDA#02-Y000CD#001	1.123	double		Y- Koordinate des Startpunktes	Startpoint Y
VDA#02-Y000CE#001	1.123	double		Z- Koordinate des Startpunktes	Startpoint Z
VDA#02-Y000CF#001	1.123	double		X- Koordinate des Endpunktes	Endpoint X
VDA#02-Y000DD#001	1.123	double		Y- Koordinate des Endpunktes	Endpoint Y
VDA#02-Y000D1#001	1.123	double		Z- Koordinate des Endpunktes	Endpoint Z
VDA#02-Y000D2#001	1.123	double		X- Koordinate des Zentrums	Center X
VDA#02-Y000D3#001	1.123	double		Y- Koordinate des Zentrums	Center Y
VDA#02-Y000D4#001	1.123	double		Z- Koordinate des Zentrums	Center Z
VDA#02-Y000D5#001	;H-;H+;H_V;h-;h+;h_v	string		Art des Bogens	Arctype
VDA#02-Y000D6#001	45	double	Grad	Radius des Bogens	Radius
VDA#02-Y000D7#001		char		Warteposition	Waitpos
VDA#02-Y000D8#001		double			Dog_Space
VDA#02-Y000D9#001		double	m	Stop Abstand	Stop_Dist
VDA#02-Y000DA#001	2	double	m/s	Beschleunigung	Acceleration
VDA#02-Y000DB#001	2	double	m/s	Abbremsung	Deceleration
VDA#02-Y000DC#001	true	boolean		Aufholen möglich	Accumulating
VDA#02-Y000DD#001	2.2	double	m/s	Rotationsgeschwindigkeit	Rotspeed
VDA#02-Y000DE#001	2.3	double	m/s	Geschwindigkeit	Velocity
VDA#02-Y000DF#001	2.3	double	s	Entladezeit	Unloadtime
VDA#02-Y000E#001	20	double	s	Refresh- Zeit	Refreshime
VDA#02-Y000E1#001	10	double	s	Transferzeit	Transferime
VDA#02-Y000E2#001	false	boolean		Lückenziehen möglich	Lueckenziehen
VDA#02-Y000E3#001	0.1	double	m	Abstand zwischen zwei Fahrzeugen	Move_dist
VDA#02-Y000E4#001	4.4	double	m	Länge der beweglichen elemente	MU_Len
VDA#02-Y000E5#001	12	integer		Anzahl der Fahrwerke	MU_Quant

Abbildung 5: Beispiel Attribut-Mapping

Nachdem die Rollen, Klassen und die dazugehörigen Attribute definiert worden sind, mussten noch die Schnittstellen festgelegt werden. Als externe Verknüpfung wurde die AML-Standardverknüpfung für Collada-Dateien gewählt, um die Geometriedaten anzubinden.

Für die internen Vorgänger – Nachfolger existierten zwei unterschiedliche Konzepte, zum einen direkte Verknüpfungen der einzelnen Objekte über Interfaces, zum anderen die Verknüpfung über separate Objekte als Repräsentanz für den Übergabeort. Für die Umsetzung der Fördertechnik wurde die zweite Möglichkeit gewählt, um in späteren Versionen der Schnittstelle die Übergabeorte genauer definieren zu können.

Im finalen Schritt wurden die CAD-Objekte mit ihren Attributen den neu definierten Klassen und Werten zugewiesen. Hierfür wurden zwei einfache Tabellen erstellt, die die Verknüpfung und somit das Schreiben der AML-Datei ermöglichen. Dieses Vorgehen bietet, im Falle einer Änderung an den Klassen, den Vorteil, dass nicht jedes Mal der Exporter neu programmiert werden muss, sondern nur die Tabellen aktualisiert werden müssen. Die gleichen Tabellen wurden dann noch für die Importer definiert. Somit ist ein Datenaustausch übergreifend mit AML möglich.

Um die Schnittstelle umzusetzen, wurde im ersten Schritt ein Konverter programmiert, der die GSL-FT-Datei in AML umsetzt. Dieser Schritt war nötig, um zu testen, ob die definierten Rollen und Klassen sowie das Format selbst valide sind. Der zweite Schritt war dann die Umsetzung in der abgebenden Software, in diesem Fall TriCAD. Dort ist es nun möglich, die Fördertechnikdaten entweder im GSL-FT-Format oder aber in AML zu exportieren.

Die erste Erweiterung der Daten ist durch den Export der Geometriedaten geschehen. In AML werden für alle im Ressourcenbaum befindlichen Objekte auch die Collada-Dateien erzeugt und in der AML-Datei referenziert. Somit wäre auch der Aufbau eines

dreidimensionalen Simulationsmodells möglich. Dies wird jedoch aktuell noch nicht genutzt, da nicht jede Simulationssoftware Collada nativ lesen kann und die Daten somit noch gewandelt werden müssten.

Zum Schluss mussten dann noch die aufnehmenden Systeme angepasst werden. Dies wurde zuerst für den VDA Automotive Bausteinkasten für Plant Simulation sowie für die VIBN-Software WinMod/Simline umgesetzt und steht Ende 2017 zur Verfügung. Des Weiteren ist es möglich, die Geometriedaten für eine bewegte 3D-Visualisierung (Interviews3D) zu nutzen, wobei hier die Geometrien aus der AML-Datei genommen werden und die Bewegungen aus dem Simulationswerkzeug berechnet und in eine Collada-Datei ausgeleitet werden.

5 Ausblick

AML ist ein mächtiges Werkzeug, um Daten für die digitale Fabrik neutral auszutauschen. Das gilt nicht nur für die Automobilindustrie, sondern für jegliche automatisierte Produktion. Erste Einsätze zeigen bereits, wie vielschichtig der Einsatz ist. Aber Vorsicht ist geboten. Ohne weitere branchenspezifische Normierungen wird ein Datenaustausch auch in Zukunft nicht immer ohne Konverter möglich sein.

Übergreifend definierten Klassen und Attributen, inklusive dazugehörigem Mapping für jede einzelne Software, haben sich als gute Lösung etabliert und kommen so auch weit über die automobilen Einsatzgebiete hinaus zum Einsatz.

Als nächste Schritte werden die Werkzeuge der Automatisierungstechnik angebunden. So wurde z. B. bereits die Elektroplanungssoftware EPlan um eine AML-Schnittstelle erweitert. Bei diesen Anbindungen wird sich auch herausstellen, ob die Inhalte der aktuellen Definition ausreichen oder ob diese erweitert werden müssen.

Ein noch nicht gelöstes Problem sind die Grafikformate. Hier konkurriert das in AML implementierte Format Collada mit den in den meisten Product Lifecycle Management Systemen vorhandenen Formaten (z. B. JT, Jupiter Tessellation). Es ist aber bereits ein Lösungsvorschlag beim AML-Verein beantragt und wird aktuell geprüft.

Literatur

AutomationML: www.automationml.org. Letzter Zugriff am 06.07.2017.

Collada: www.khronos.org/collada/. Letzter Zugriff am 06.07.2017.

Drath R.: Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Berlin: Springer 2010.

eCI@ss: www.eclass.eu/. Letzter Zugriff am 06.07.2017.

Jörg, T.; Wacker, R.: Generische Simulationslösung Fördertechnik. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer-IRB 2008, S. 11-20.

PLCopen: www.plcopen.org. Letzter Zugriff am 06.07.2017.

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

Virtuelle Inbetriebnahme zur Absicherung flexibler Produktionssysteme

Virtual Commissioning for Flexible Manufacturing Control Systems

Inga Thiel, BMW AG, München (Germany), inga.thiel@bmw.de

Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, Universität des Saarlandes – Lehrstuhl für
Konstruktionstechnik, Saarbrücken (Germany), vielhaber@lkt.uni-saarland.de

Abstract: Producing industries are forced to adjust processes to changing customer and market requirements. Information technology enables this transformation with enhanced transparency and connectivity. Nevertheless, digitalisation bares severe risks for production stability. Intelligent systems gain new complexity using massive data streams and interconnected networks. Virtual Commissioning contributes to early risk estimation and minimization for production facilities. Thus, inefficient operation states can be avoided or construction can be optimised. An exemplary development environment displays the installation of simulation methods. For evaluating and rating digitalisation approaches, targets must be defined and displayed transparently. Thus, an analytically calculable and for simulation adjustable benefit examination is added to the discussion on Industry 4.0.

1 Einleitung

In der Automobilindustrie führen nicht nur kürzere Produktzyklen und individuelle Produkte zu steigender Volatilität, der Übergang zu neuen Technologien wie Elektromobilität oder autonomes Fahren übersteigt die Wandlungsintensität und -geschwindigkeit zurück liegender Jahrzehnte bei Weitem. Digitalisierung ermöglicht flexible Prozesse durch Transparenz und Vernetzung (acatech 2013), birgt jedoch auch die Gefahr unbeherrschbar komplexer Strukturen, was zu fehlender Akzeptanz und Überlastung des Bedien- und Servicepersonals führt. Unternehmen, die schlechte Erfahrung mit Hochautomation gemacht haben, vermeiden digitale Innovationen fortan (Lay und Schirrmeister 2001). Virtuelle Inbetriebnahme unterstützt die Optimierung von Maschinen und Anlagen. Diese Arbeit beschreibt die Auswertung einer Fertigungseinrichtung zur Einordnung von Produktionsressourcen in die Zielsetzung der Digitalisierung.

Flexibilität und schnellere Reaktion auf Kunden und Marktanforderungen. Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Stückzahl und Produktvarianten sind Voraussetzungen für globale, vernetzte Produktion. Dabei definiert sich Flexibilität als veränderliche Produktionszahlen in vorhersehbarem Rahmen, z. B. Mehr- oder Minderproduktionsvolumen oder zusätzliche Derivate, Wandlungsfähigkeit hingegen bezeichnet Anpassung an unvorhersehbare Änderungen oder über die geplanten Flexibilitätsreserven hinaus (Nyhius 2008). Im beschriebenen Projekt wurden die Produktionszahlen von Maschinen einer komplexen Produktionsanlage in verschiedenen Betriebspunkten verglichen. Die technische Verfügbarkeit muss möglichst unabhängig von Produktionsvolumen und Derivatevariabilität hoch sein. Variantenflexibilität bedeutet, dass vielfältige Typen in beliebiger Reihenfolge gefertigt werden können. In der betrachteten Anlage wurden im betrachteten Zeitraum von einem Monat insgesamt 10 verschiedene Derivate gefertigt. Einige Schichten wurden sortenrein beliefert, andere in einer Typenmischung. Über die Linie verändert sich die Derivatemischung. Die technische Verfügbarkeit verschiedener Zellen der Linie wurde bei einerseits verschiedener Anzahl an Derivatewechseln und andererseits bei variierendem Produktionsvolumen verglichen. Abbildungen 2 bis 5 zeigen Verläufe der technischen Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Produktionsvolumen (Abb. 2 und 3) und Anzahl der Derivatewechsel (Abb. 4 und 5).

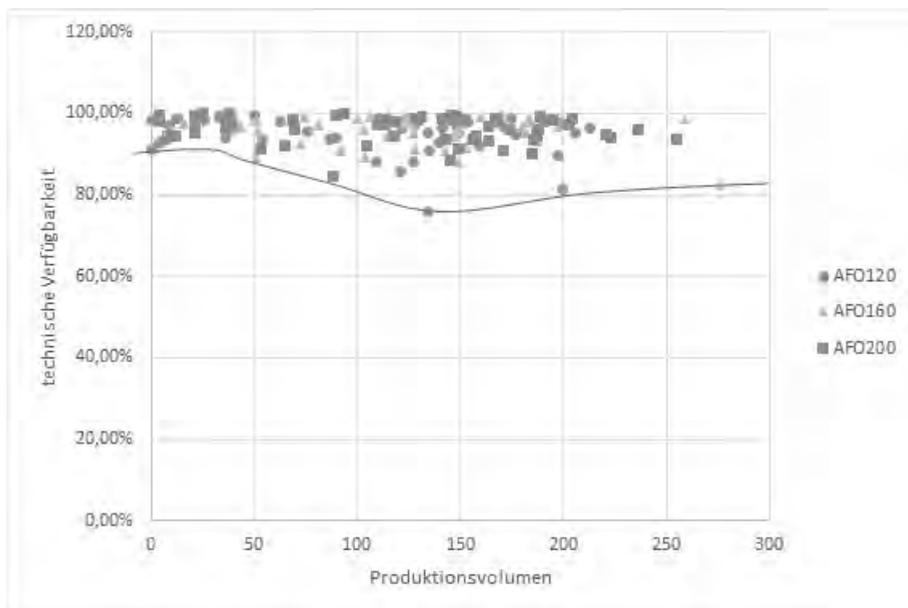


Abbildung 2: Zellen mit schlechter technischer Verfügbarkeit bei hohem Produktionsvolumen

Es lassen sich grundsätzlich zwei Ergebnisse grafisch ermitteln: Typ I hat bei geringer Anlagenauslastung eine gute technische Verfügbarkeit, die jedoch bei steigendem Produktionsvolumen auf ein Minimum abfällt und auch bei hoher Auslastung gering bleibt und Typ II mit zunehmender Verfügbarkeit bei steigendem Volumen. Im betrachteten Beispiel zeigen die Zellen AFO120, AFO160 und AFO200 bei geringem

Produktionsvolumen eine hohe technische Verfügbarkeit (Abb. 2). Ab einem gewissen Produktionsvolumen zeigt sich ein Absinken der technischen Verfügbarkeit auf ein Minimum. Die Kurve bleibt bei steigendem Volumen auf niedrigerem Niveau. Dieses Absinken der technischen Verfügbarkeit weisen AFO100, AFO140 und AFO180 nicht auf. Die technische Verfügbarkeit ist zunächst gering und steigt bei zunehmendem Produktionsvolumen an (Abb. 3).

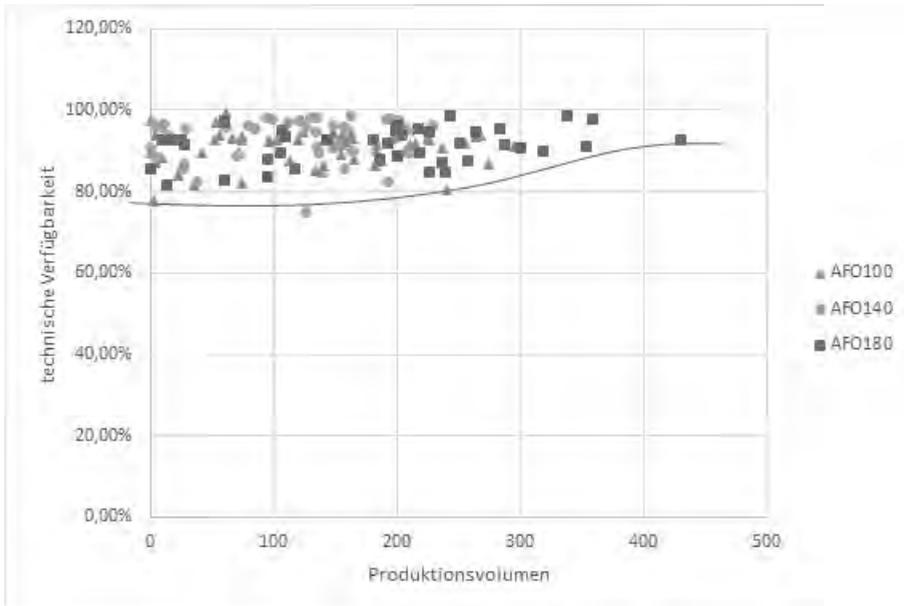


Abbildung 3: Zellen mit guter technischer Verfügbarkeit bei hoher Auslastung

Diese Zellen sind mit ausreichend oder gar überschüssigen Ressourcen ausgestattet oder der Arbeitsumfang ist entspannt. Die Maschinen können ihr Pensum gut abarbeiten und müssen gelegentlich auf die vorausgegangenen oder nachfolgenden langsameren Zellen warten.

Ähnliche Kurvenverläufe sind nicht nur für das Produktionsvolumen, sondern auch für variables Derivatemix ersichtlich (Abb. 4 und 5).

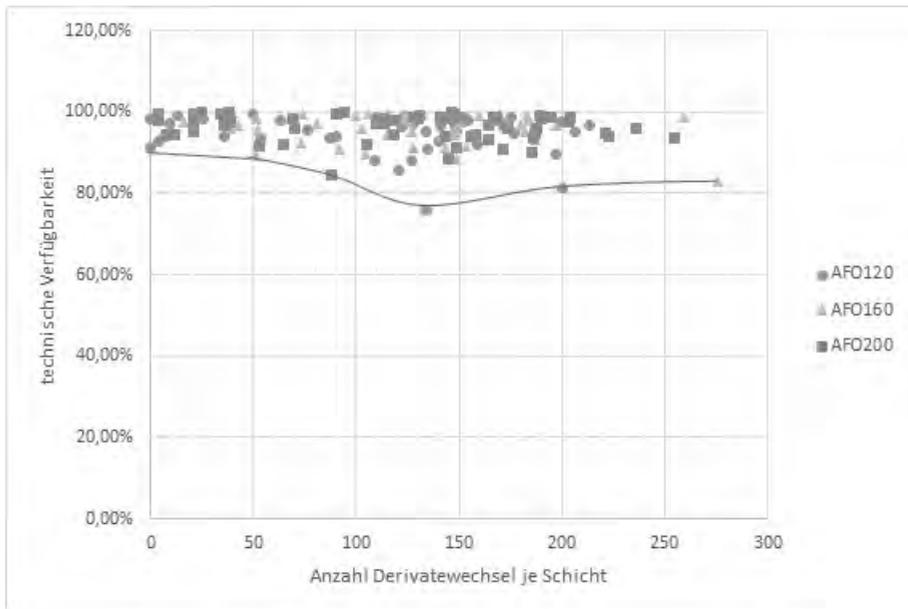


Abbildung 4: Zellen mit offensichtlicher Abhängigkeit von der Variantenflexibilität

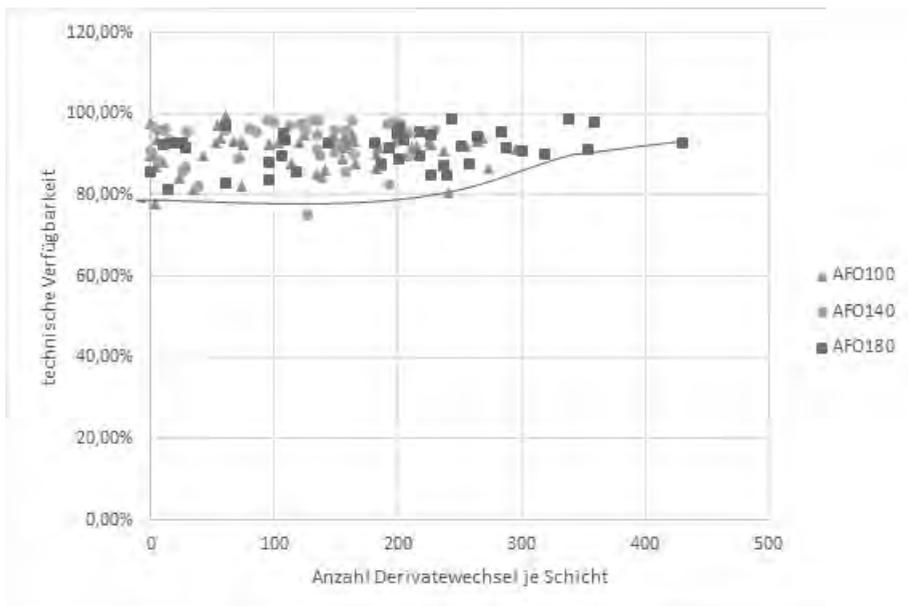


Abbildung 5: Zelle mit ausbalancierter Reaktion auf Variantenflexibilität

Alle ausgewerteten Zellen folgen den beiden beschriebenen Kurvenverlaufstypen. Mit dieser Bewertung lassen sich kritische Betriebszustände erkennen. Im Beispiel sind die Zellen in Abbildung 3 gut verfügbar, die Zellen in Abbildung 2 sind von der

Kapazität zu knapp bemessen und müssen nachgebessert werden. Wenn diese Zahlen und Grafiken schon in der Konstruktionsphase verfügbar sind, können Optimierungen frühzeitig erfolgen.

4 Ausführungsbeispiel

Mit Hilfe eines Simulationsmodells wird die oben beschriebene Methode bereits frühzeitig im Planungsprozess einsetzbar. Wichtig sind insbesondere Prozessfolgen, Logistikabläufe, Datenhandling, Störungen und Fehlersituationen, sowie Kommunikation der Maschinen untereinander und mit weiteren Produktionsressourcen. Logistische Abläufe lassen sich prinzipiell auch mit Ablaufsimulation erfassen, die konkrete Steuerungssoftware wird hierbei jedoch abstrahiert, was keine Aussage auf die Software zulässt. Als Ausgangspunkt wird Virtuelle Inbetriebnahme gewählt, da hiermit das reale Anlagenverhalten steuerungstechnisch gut abgebildet wird und das Modell die Abläufe intuitiv verständlich darstellt. Das Verhaltensmodell wurde mit WinMOD von Mewes und Partner erstellt, die Visualisierung mit RF-Suite von EKS Intec GmbH.

Die Detailtiefe der Simulation lässt sich durch ergänzende Programme erweitern, was ein Abwägen zwischen Genauigkeit und Aufwand erfordert. Um die Informationsverwaltung und –aufbereitung angemessen erfassen zu können, müssen alle von der Digitalisierung betroffenen Automationsebenen in der Simulation erfasst werden. Auf der Sensor-/ Aktorebene sind zunehmend Cyber-Physical-Systems im Einsatz, vernetzte Komponenten, die untereinander und über das Internet kommunizieren. Die Datenmenge und –verfügbarkeit in der Feldebene steigt und es ist eine wachsende Herausforderung, aus den Rohdaten verwertbare Informationen zu gewinnen. Die Feldebene wird durch die Virtuelle Inbetriebnahme bereits adäquat erfasst. Das Beispielmmodell wird darüber hinaus um eine Integrationsumgebung für das Manufacturing Execution System MES ergänzt. Eine Testumgebung der übergeordneten Steuerung und Datenbank auf einer virtuellen Maschine mit VM Ware Player bildet Auswerteroutinen des MES-Systems ab. Dies beinhaltet insbesondere die Auftragsverwaltung, Qualitäts-, Ergebnis- und Betriebsdatenerfassung, Verwaltung der Bauteildaten und Anlagen- und Maschinenparametrierung. Das darüber liegende ERP-Programm (Enterprise Resource Planning) wird nicht in die Simulation mit aufgenommen, da diese Informationen überwiegend statisch gepflegt werden und die relevanten Daten auch im MES abgegriffen werden können. Daher reicht für das beschriebene Beispiel ein Modell, das die Spanne von Ein-/ Ausgangssignalebene bis zur MES-Ebene umfasst. Auf die detaillierte Simulation der spanenden Bearbeitung innerhalb der Maschine wird verzichtet, da von diesen Inhalten nur wenig Aussagekraft auf die Automatisierung zu erwarten ist.

Mit einem Stresstest mit schnellen Derivatewechslern und variablem Produktionsvolumen werden die Projektzielwerte bewertet. Damit kann beobachtet werden, in wie weit die Steuerung den gestellten Herausforderungen gerecht wird. Durch die für den Bediener unüberschaubare Datenmenge und Autonomie eigenintelligenter Produktionssysteme, ist eine geschlossen analytische Beschreibung der Prozesse nicht mehr möglich. Stattdessen können Lernsituationen durchfahren und positive Maschinenreaktionen verstärkt werden. Dazu müssen vorgegebene Zielwerte maximiert, minimiert oder auf einen Zielwert hin optimiert werden. In der

Entwicklungsumgebung werden dem Werker die zu optimierenden Werte angezeigt. Durch Kennzahlendarstellung und Farbumschlag werden Tendenzen intuitiv verständlich und können durch Variation der Anlagenkonditionen optimiert werden; in der Beispieldarstellung Abbildung 2 wurden exemplarisch die Zielwerte Ausbringung (Soll-/Ist-Vergleich), Energieverbrauch und technische Verfügbarkeit herausgegriffen. So lässt sich menschliche Kreativität und Erfahrung mit maschineller Zuverlässigkeit und Rechengeschwindigkeit verbinden.

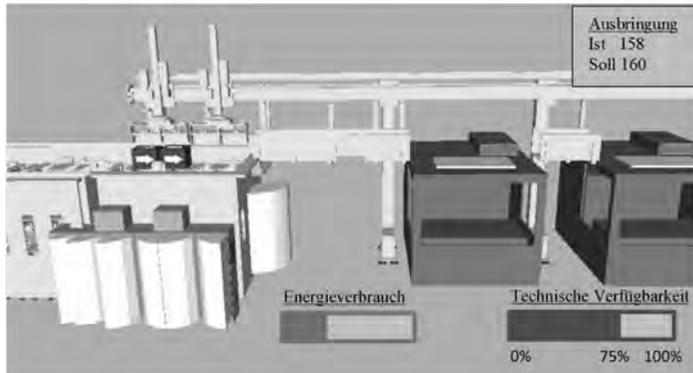


Abbildung 6: Simulationsumgebung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Erweiterung einer klassischen Virtuellen Inbetriebnahme lassen sich Produktionssysteme auf die Eignung für die Herausforderung der Digitalisierung überprüfen. Das Beispielprojekt zielt auf die Flexibilität des Systems ab. Die Ziele der Automatisierung sind vielfältig (Pfrommer et al. 2014), die beschriebene Methode lässt sich auch auf andere Zieldefinitionen anwenden. Wenn die Auswertungen früh im Planungsprozess eingebunden werden, können Optimierungen bereits in der Konstruktions- und Entwicklungsphase durchgeführt werden. Hierfür eignet sich besonders Virtuelle Inbetriebnahme, da die Steuerungsstruktur gut abgebildet wird, die Darstellung intuitiv verständlich und Virtuelle Inbetriebnahme mittlerweile im Projektablauf weit verbreitet ist. Damit können die Anlagen auf variablen Produktionszuständen geprüft werden. Ungünstige Zustände können durch z. B. durch eine veränderte Verteilung der Prozesse verbessert werden.

Die Modellerstellung ist jedoch recht aufwändig, gerade bei umfangreichen Systemen. CAD Daten sind nicht immer verfügbar, sie liegen nicht in einem nutzbaren Format oder müssen umfangreich formatiert werden. Im beschriebenen Projekt waren das Einlesen und Anpassen der Konstruktionsdaten recht aufwändig, insbesondere die Kinematisierung. Im Weiteren wurden Bibliothekselemente für die wichtigsten Elemente erstellt. Außerdem muss es die Performance zulassen, auch große Anlagen über mehrere SPS sicher abzubilden. Der Hard- und Softwareumfang wird schnell umfangreich und aufwändig. Die Simulationemethode für Komplettsysteme muss weiter stabilisiert werden. Im beschriebenen Beispiel kann der Aufwand bei einer Vielzahl beteiligter Fertigungseinrichtungen reduziert werden, indem parallele,

identische Maschinen durch Verhaltensmodelle ersetzt werden, wodurch jedoch die Detailtiefe der Simulation abstrahiert wird und die Aussagekraft geprüft werden muss.

Literatur

- Ernst & Young, Bitcom Research (Hrsg.): Industrie 4.0 – das unbekannte Wesen. Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. 2016.
- Forschungsunion und acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft (Hrsg.). Frankfurt/ Main 2013
- Lay, G., Schirmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion. In: Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung 22 (2001), Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, S. 12.
- Nyhius, P., Reinhart, G., Eberhard, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. TEWISS: Hannover 2008.
- Pfrommer, J., Schleipen, M., Usländer, T., Epple, U., Heidel, R., Urbas, L., Sauer, O., Beyerer, J.: Begrifflichkeiten um Industrie 4.0 – Ordnung im Sprachwirrwarr. In: Jumar, U., Diedrich, C. (Hrsg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme. Institut für Automation und Kommunikation Ifak e.V. Magdeburg 2014, S. 8 – 15.

Simulationsgestützte Planung von Lager- und Produktionsversorgungsprozessen

Planning of Warehouse and Supply Processes for the Production using Simulation

János Jósваи, Norbert Szántó, Széchenyi István Universität, Győr (Hungary),
josvai@sze.hu, szanto@sze.hu

Abstract: The paper describes a simulation application in the automotive industry. A two stage simulation analysis will be detailed. The main functionality of the investigated system is detailed. The paper describes the main goals and planning steps of simulation, gives insight into the modelling of production, logistics and warehouse areas. The complexity of parallel planning and simulating of a greenfield production and logistics system investment is detailed. The major steps of the simulation study are described, and the main results are highlighted.

1 Problemformulierung

In dem folgenden Praxisbeispiel werden eine Produktionsfirma, die als Hauptzulieferer arbeitet, betrachtet und eine Anwendung der Simulation in der Praxis umgesetzt. Die Aufgabe wird durch die Bauplanung einer neuen Produktionshalle ins Leben gerufen. Diese neue Halle soll Platz sowohl für die Produktion als auch für das Lagerbereich anbieten. Das Projekt besteht aus zwei größere Phasen.

Die erste Phase beschäftigt sich mit der Bestimmung der geeigneten Materialversorgungskonzeption. Drei unterschiedliche Varianten sollen untersucht werden: unterirdische automatisierte Materialversorgung, Förderanlage und Versorgung mit Routenzügen.

Die zweite Phase hat die Aufgabe, den Lagerbereich detailliert zu analysieren. Dabei muss die vorher ausgewählte Materialversorgungstechnologie in Betracht gezogen werden. Der Lagerbereich hat mehrere Funktionsbereiche sowie Warenein- und Warenausgang, Hochregallager, Umschlagsbereich und ein Kommissioniersystem für kleine Teile. Im Lagerbereich sollen unter anderem die Funktionalitäten, die Geräte, Lager- und Zwischenspeicherplätze, Platzzuordnung, Aufgabensteuerung und die einzelnen Prozessabläufe bestimmt werden.

In beiden Phasen wird der Produktionsbereich entsprechend abgebildet. Der Produktionsbereich soll funktionsmäßig die einzubauenden Teile, Fertigteile und Verpackungsmaterial realistisch abbilden. Die Produktionsabläufe sollen detailliert

modelliert werden, um die Durchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge möglichst realitätsnah simulieren zu können. Das Modell soll zudem den Umstellungsvorgang an den Maschinen und Montageplätzen beinhalten.

2 Praxisorientierte Simulationsstudien

In der Literatur sind zahlreiche Publikationen über Praxisanwendungen zu finden. So wird die Simulationsanalyse eines alternativen Layouts in der Solarcell-Industrie in Bangsow (2012) beschrieben. Hier wird vorgestellt, wie die Simulation in einer sich schnell verändernden Umgebung eingesetzt werden kann (Bangsow 2012). Am Beispiel der Daimler AG wird die simulationsgestützte virtuelle Logistikplanung für die Montage betrachtet (Bracht et al. 2008). In Staab et al. (2013) geht es um die Effizienzsteigerung für Routenzüge zur Produktionsversorgung mit Hilfe der Ablaufsimulation. Strategien und Werkzeuge zur Planung der Materialbereitstellung für Produktionsprozesse werden in Goldhahn et al. (2016) behandelt.

In diesem Artikel wird von der Konzepterstellung bis zu Detailanalyse der unternehmerische Einsatz der Ablaufsimulation vorgestellt. Die Spezifität der Thematik liegt in dem Planungs- und Anwendungsziel. Hierzu wird die in Abbildung 1. dargestellte Prozesskomplexität abgebildet und untersucht.

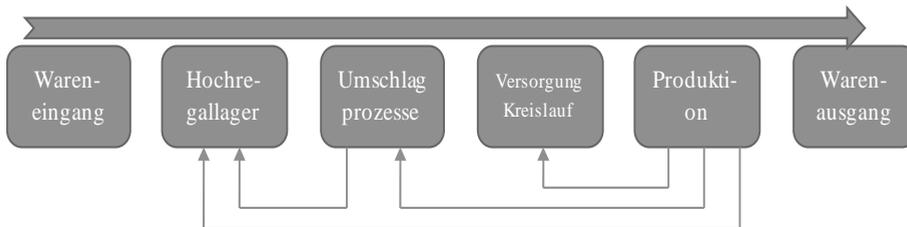


Abbildung 1: Hauptfunktionen zur Simulationsanalyse

Die Analyse integriert für die neue Produktionshalle die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Bereichen:

- Wareneingang,
- Hochregallager (Roh-, Fertigteile und Verpackungsmaterial),
- Umschlag- und Kommissionierprozesse,
- Materialversorgungskreislauf,
- Produktionsabläufe und
- Warenauslieferung.

Da die beteiligte Firma die Simulationstechnik in solch einer Tiefe noch nicht angewendet hat, ist die Durchführung der gemeinsamen Arbeit interessant und intensiv. Um die Simulationsanalyse durchführen zu können, wird Plant Simulation angewendet.

Die Fachliteratur beschreibt den Ablaufprozess der Simulation (Banks 1998; Law und Kelton 2000; Kühn 2006; VDI 2010; März et al. 2011; Curry et al. 2011). In Abbildung 1 sind die vier Hauptschritte detailliert dargestellt. In der Konzeptphase des Projektes wird diese Vorgehensweise angewendet. Die Anfangsbedingungen der

Firma geben hierzu sehr genau das zu untersuchende System und dessen Varianten vor. Der Detaillierungsgrad des konzeptuellen Modells wird anhand der Angaben bestimmt. Die Unterschiede der Modellvarianten sind eindeutig ableitbar, die Untersuchungsziele sind bezüglich der Hauptmerkmale identisch.

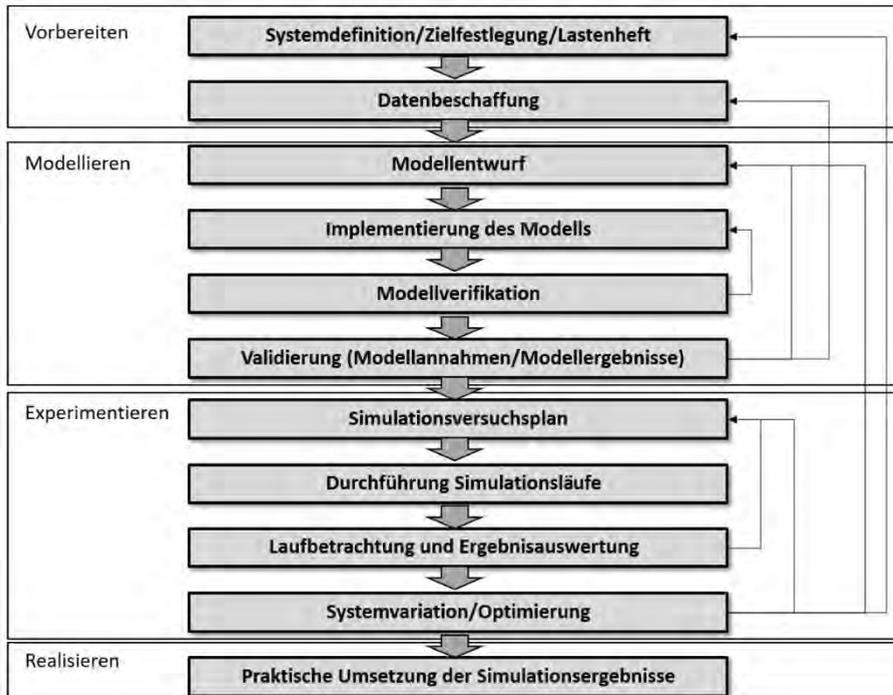


Abbildung 2: Ablaufprozess der Simulation (Kühn 2006)

Im Falle der Detailanalyse ergibt sich ein anderes Bedingungssystem, da die Simulationsstudie die Planung auch zeitlich sehr eng mitbegleitet. Zu Beginn sind Systemdefinition und Ziele noch in der Planung. Dies ermöglicht keine Verfolgung eines stabilen Ablaufprozesses in der Simulationsmodellbildung.

Am Anfang der Ausarbeitung der Detailstudie lassen sich die Systemdefinitionen der einzelnen Bereiche noch nicht ausreichend bestimmen. Die Funktionalitäten, Operationselemente, logische Zusammenhänge, Platzzuordnungsregeln sind unter anderem unklar. Aus diesem Grund müssen die Bereiche zunächst nur mit ihren Kernfunktionalitäten grob abgebildet werden. Um die Zusammenarbeit der Teilmodelle (Hauptfunktionen s. Abb. 1) erarbeiten zu können, müssen diese Grobmodelle mit sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad und schon sehr früh miteinander gekoppelt werden. So gibt es sowohl Bereiche, in denen die Modellierung von „Oben nach Unten“ erfolgte, als auch welche, in denen sofort detailliert modelliert wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht zahlreiche Untersuchungen, um Ideen und im aktuellen Planungszustand „noch mögliche“ Varianten auszuprobieren. Zeitgleich bedeutet es eine sehr intensive, mühsame Kooperation mit der Partnerfirma.

Abbildung 3 stellt die Hauptmeilensteine von Entscheidungen während der Detailanalyse dar. Die einzelnen Entscheidungspunkte sind nach Hauptfunktionen zusammengefasst.

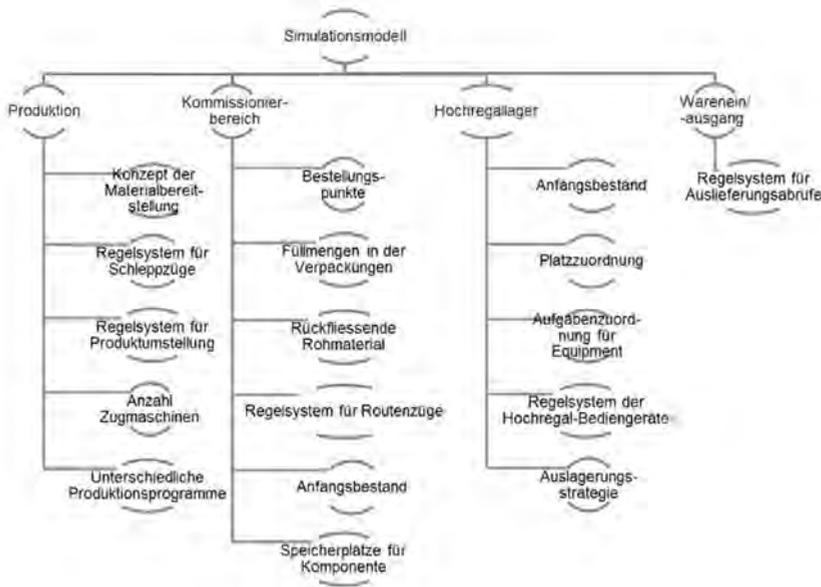


Abbildung 3: Hauptmeilensteine von durch Simulation unterstützten Entscheidungen

Mit Hilfe der Simulationsanalyse werden die entscheidungsbegründenden Ergebnisse ermittelt. Diese Entscheidungen zeigen die Vorteile von Simulation, denn es werden strategische, taktische und operative Fragestellungen ebenfalls untersucht. Viele der Simulationsmodellvarianten ergeben einen nicht realisierbaren Lösungsweg. In solchen Fällen muss das Simulationsmodell teilweise um- bzw. neugebaut werden. Die Ungewissheit der Systemdefinition bewirkt einen sich sehr dynamisch entwickelnden Modellierungsablauf mit zahlreichen Zwischenstufen. Die Verifikation und Validierung der Simulationsmodelle erfolgt mit Hilfe von unterschiedlichen Techniken. Um die Übereinstimmung mit den vereinbarten Zielen zu klären, wird eine Begutachtung angewendet. Bei Funktionen, bei denen es möglich ist, werden Festwerte angewendet (z. B. Durchsatz der Montageinseln, Durchsatz der Aufzüge). Zudem wird ein Monitoring angewendet, um Auslastungen der Routenzüge, Hochregalbediengeräte, Logistikpersonal oder Durchlaufzeiten der Bestellungen und Pufferbelegungen im Lager- und Produktionsbereich darzustellen. Dadurch kann bestimmt werden, dass die dargestellten Werte und die aktuelle Situation im Simulationsmodell konsistent sind. Die Methode des strukturierten Durchgehens wird während der Simulationsstudie regelmäßig durchgeführt. Dadurch werden mit Hilfe von Fachverantwortlichen Probleme, Fehler und Unklarheiten identifiziert. Diese Interaktionen dienen der Verbesserung der Ergebnisse in den einzelnen Phasen.

3 Erstellung des Simulationsmodells und Analyseablauf

Die Konzeptanalyse und Detailanalyse findet innerhalb von 12 Monaten statt. Im Folgenden werden die Hauptstufen der Simulationsstudie einzeln vorgestellt.

3.1 Konzeptanalyse

Die Analyse mit Hilfe der Ablaufsimulation soll mehrere Fragen beantworten. Bei der Konzeptanalyse wird die Anwendbarkeit von unterschiedlichen Versorgungstypen bestimmt:

- unterirdisches Fördersystem,
- hängende Förderanlage,
- Routenzug.

Die Modellierung in diesen Fällen erfolgt von „Oben nach Unten“, es werden die Hauptelemente identifiziert (z. B. Produktionsinseln mit Materialaufwand, um Nachbestellungen abzubilden, Förderlinien und deren Steuerungslogik, Pufferplätze in der Produktion und im Lagerbereich). Die Abbildung erfolgt durch Modellierung der Haupteigenschaften (z. B. Einbaureihenfolge der unterschiedlichen Materialien, Anfangsbestände, Verpackungsarten und Füllmengen, Schichtmodell, Produktionspläne, Montageinseln ohne Abbildung der einzelnen Detailoperationen).

Folgende Eingangsdaten stehen zur Verfügung:

- Produktionsprogramm (untersuchter Zeitraum 1 Monat),
- Prozessdaten der Produktionsinseln (15 unterschiedliche Inseln),
- Aufzug – Supermarkt – Produktionsinsel – Arbeitsstation Zuordnung,
- Verpackungseigenschaften (Produktion, Ein- und Auslieferung),
- Einbaureihenfolge der Komponenten,
- Zeitaufwand für Lagerprozesse,
- Layout und Linienführung der Materialversorgung,
- Schichtordnung,
- Anfangsbestände und
- Bestandhaltungsregeln der Produktionsinseln.

Folgende Größen sollen bestimmt werden:

- Durchlaufzeit der Materialbestellungen,
- benötigte Speicherkapazitäten,
- Prozesseigenschaften der Zusammenarbeit und Kopplung von manueller und automatisierter Materialbewegung,
- Flexibilität bezüglich Produktvarianten- und Produktionsmengenveränderungen und
- Versorgungssicherheit während technischer Störungen des Versorgungssystems

Die unterschiedlichen Versorgungstypen sollen die Warenmenge im Produktionsbereich möglichst minimal halten. Trotzdem darf keine Produktionsstörung wegen fehlender Menge an Rohmaterial zugelassen werden. Es werden mehrere Supermarktbereiche in der Produktion vorgesehen, die während der Analyse und des Planungsprozesses mehrmals verändert werden. Es wird untersucht, wie die Belastung der Supermärkte abläuft und, wie die Fertigteile und Verpackungsmaterial in den

Lagerbereich zurückfließen kann. Als Beispiel wird das Modell über das Elektrohängebahnsystem in Abbildung 4 gezeigt.

In der Konzeptanalyse werden folgende Varianten in Kombination miteinander untersucht:

Unterirdisches Fördersystem:

- Verpackungsarten und Füllmengen – drei unterschiedliche Varianten
- Pufferstrukturierung (Anzahl und Räumlichkeiten) und Belegungsgrenzen – drei unterschiedliche Modellvarianten

Hängende Förderanlage:

- Anordnung und Steuerungslogik der Aufzüge – drei unterschiedliche Varianten
- Lagerbereich: Unterschiede in Anzahl und Steuerung der Aufzüge, interne Fördersteuerung mit unterschiedlichen Pufferkapazitätsgrenzen – drei Modellvarianten

Routenzug:

- Kreisfahrten – drei unterschiedliche Varianten
- Lagerbereich: interne Aufgabenabwicklung, unterschiedliche Pufferkapazitätsgrenzen – insgesamt neun Varianten

Die Durchlaufzeiten der Materialbestellungen sind für alle Versorgungstypen annehmbar. Die benötigten Pufferkapazitäten sind sowohl beim unterirdischen als auch hängendem Fördersystem kritisch und somit nicht realisierbar. Die geplante Struktur der hängenden Förderanlage kann die Versorgungssicherheit bei technischer Störung nicht erfüllen. Anhand der geprüften Merkmale wird aus Investitions- und Flexibilitätsgründen die Routenzugversorgung ausgewählt.

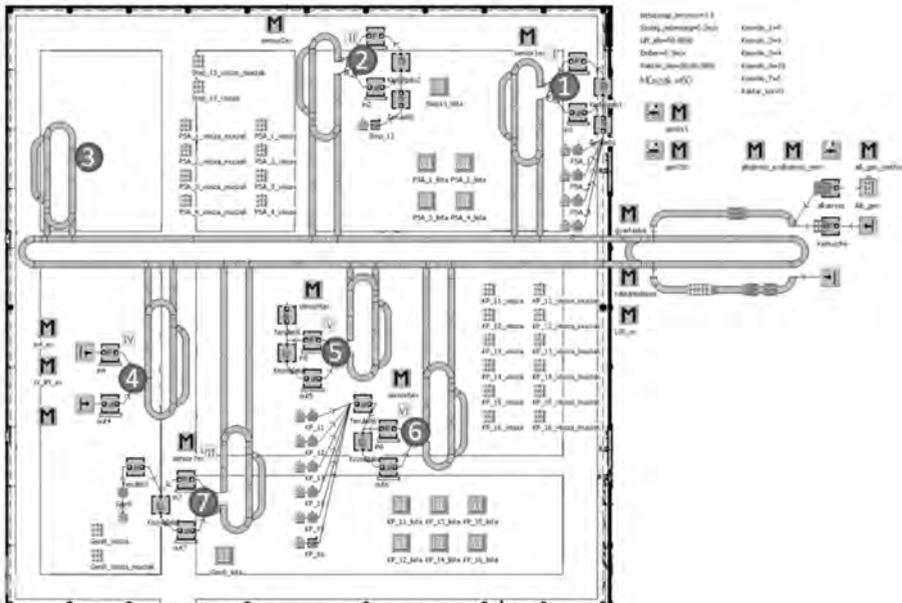


Abbildung 4: Simulationsmodell der Konzeptphase

Zum Abschluss der ersten Phase wird die Empfindlichkeit des Routenzugsystems untersucht und bestimmt, wie die Linienführung innerhalb des Produktionsbereiches aussehen und welchen zeitlichen Rahmen die Lagerprozesse für die Routenzug Be- und Entladung haben sollen. Es wird bestimmt, mit welcher Zusammenstellung der Routenzug gebildet werden soll, wobei drei unterschiedliche Wagentypen in Betracht gezogen werden (Kleinladungsträger (KLT), leere Ladungsträger (LT) und Rohmaterial).

In der Konzeptanalyse laufen Planungsaufgaben und Simulationsanalyse parallel. Es werden die Bedingungen und benötigten Parameter der einzelnen Versorgungstypen durch die Planungsaufgaben ermittelt und die Simulationsanalyse gibt Antworten auf Fragestellungen, die eine Weiterplanung ermöglichen. Für die interne Layoutplanung liefert die Simulationsanalyse die Grundspezifikationen (z. B. wie die Pufferbereiche, Aufzüge angeordnet werden sollen). Darauf basierend werden die Planvarianten der Produktionshalle zusammengestellt.

In Abbildung 5 werden die Ergebnisse bezüglich Bestelldurchlaufzeit von drei ausgewählten Varianten des Routenzugverkehrs als Histogramme dargestellt. Bei Variante a ist eindeutig zu sehen, dass die erwartete Durchlaufzeit der Materialbestellungen von 60 Minuten (blaue Linie) am besten erfüllt ist.

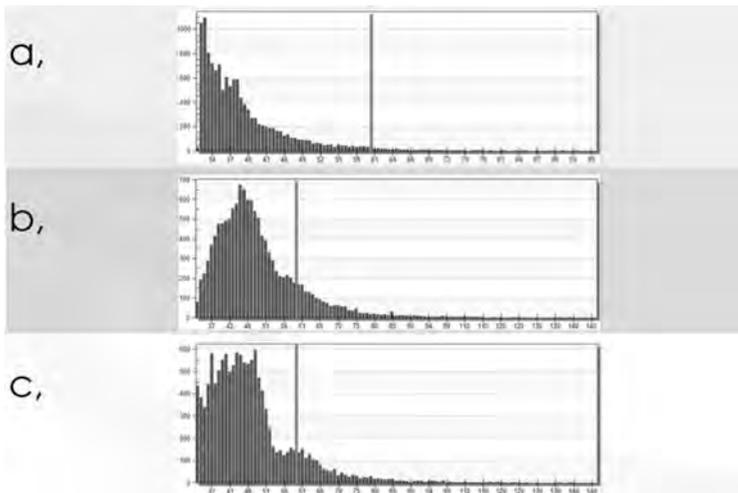


Abbildung 5: Histogramme von Bestelldurchlaufzeiten

3.2 Detailanalyse

In der zweiten Phase werden die Prozesse im Lagerbereich feingeplant und zeitgleich mit Hilfe der Simulation bewertet. Die Modellierung der Komponenten in der Detailanalyse zeigt schon deutliche Unterschiede auf. Bei der Abbildung der Produktion ko werden die Funktionalitäten (z. B. Supermarktvarianten, manuelle Operationen, Varianten der Bestellregeln, Varianten der Zuordnung von Supermärkten und Montageinseln) von „Oben nach Unten“ ins Simulationsmodell eingebaut. Die Abbildung des Hochregalbereiches erfolgt aber von „Unten nach Oben“, es müssen alle Gassen mit den einzelnen Lagerpositionszuordnungen,

Bedienungsregeln, Fördermaschinen, Personalzuordnungen und Auftragsbearbeitungslogiken Schritt für Schritt aufgebaut werden.

Für den Wareneingangs- und Ausgangsbereich werden die einzelnen Arbeitsprozesse, die nötigen Geräte, die anzuwendende Aufgabensteuerung und die Auswirkung der Priorisierung bestimmt. Im Bereich der Hochregallager wird die Platzzuordnung zusammen mit der Anzahl der Geräte und deren Aufgabensteuerung untersucht. Das Hochregallager bietet Plätze für Rohmaterial, Verpackungsmaterial und Fertigware für dreizehn unterschiedliche Produkte. In fünf Gassen arbeiten zwei Bediengeräte, die Gassen sind an beiden Enden geöffnet. Die Auslagerung von Rohmaterial und Verpackungsmaterial erfolgt am „hinteren Ende“, Materialzufuhr und Auslagerung von Fertigware erfolgt „vorne“. Die Materialbereitstellung für die Hochregalgeräte geschieht mit Hilfe von Gabelstaplern. Der Hochregalbereich bekommt Aufträge vom Umschlagbereich, dem Kommissionierbereich, von der Einlieferung, der Auslieferung und den Produktionsbereichen. Die untersuchten zahlreichen Planungsvarianten sollen im Hochregallagerbereich den entsprechenden Durchsatz sichern. Bei den Umschlag- und Kommissionierbereichen werden die Arbeitsprozesse, Kapazitäten und Ressourcenzuordnung analysiert. Diese Bereiche haben direkten Kontakt mit den Routenzügen und spielen somit eine wichtige Rolle in deren Bildung, Aufgabensteuerung und damit der gesamten Materialkreislaufbildung. Im Umschlagbereich wird die Speicherkapazität für die Rohmaterialien der laufenden Produktion bestimmt. Abbildung 6 stellt die Komplexität der Detailanalyse dar.

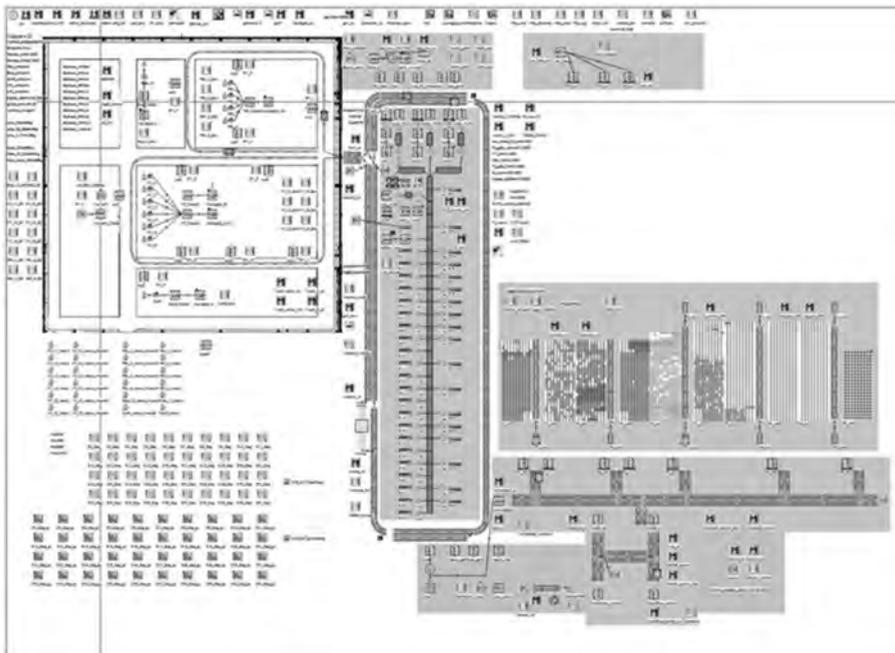


Abbildung 6: Simulationsmodell in der Detailanalyse

In den einzelnen untersuchten Bereichen werden folgende Fragestellungen beantwortet:

Produktion:

- Supermärkte – Montageinseln – Rohmaterial, Fertigware und Ladungsträger Zuordnung – vier unterschiedliche Varianten
- Be- und Entladung der Routenzüge in den Supermarktbereichen – drei Varianten
- Aufgabensteuerung der manuellen Operationen zwischen Supermärkten und Montageinseln – vier Varianten

Kommissionierbereich:

- Anordnung von Materialien im Bereich (abhängig von Kapazität und Bestellungsregelung) – fünf Varianten
- Bestellungsregeln für Kommissionierung – drei Varianten
- Beladungsregeln für Routenzüge (Zusammensetzung KLT, GLT, Leere LT, Leerfahrt, Größe des Zeitfensters für Aufenthalt im Lagerbereich) – zehn Varianten

Hochregallager:

- Anzahl von Bediengeräte – zwei Varianten
- Lagerplatzzuordnung – fünf Varianten
- Regelung von Auftragsbearbeitung für Hochregalbediengeräte – vier Varianten
- Umstellungsregelung zwischen Gassen für Bediengeräte – drei Varianten
- Regelung der Zu- und Ablieferung im Hochregalbereich – drei Varianten

Warenein- und -ausgangsbereich:

- Maschinen – Personal – Aufgabenzuordnung – vier Varianten
- Aufgabenzuordnung der Tore (Ein-/Auslieferung, Bestimmung der Vorbereitungszeiträume) – drei Varianten

Anhand der Simulationsergebnisse werden die Fragestellungen beantwortet. Die Simulationsstudie zeigt, dass die Produktion im untersuchten Zeitraum mehr als 100.000 Endprodukte herstellen kann. Dazu werden von der Produktion mehr als 15.000 Bestellungen in Richtung Lagerbereich gestellt. Diese Bestellungen können von drei Routenzügen ausgeliefert werden, insgesamt werden mehr als 5.500 Kreisfahrten benötigt. Die Simulation bestimmt das Regelsystem für die Routenzüge in Produktion und im Lagerbereich. Für das Hochregallager wird durch die Simulationsstudie nachgewiesen, dass in fünf Gassen zwei Bediengeräte mit bestimmtem Regelsystem ausreichend sind. Diese Geräte bewegen in dem untersuchten Zeitraum mehr als 16.000 Ladungseinheiten. Mit Hilfe der Simulationsanalyse wird damit die Aufgabensteuerung für das ganzheitliche System geplant, getestet und dessen Funktionsfähigkeit nachgewiesen.

4 Fazit

Hauptziel der Feinplanung und Simulationsanalyse ist die störungsfreie Abwicklung von Hochlast in der Produktion. Während der Ausführung werden komplexe Wechselwirkungen der einzelnen Bereiche abgebildet und mit Hilfe der Simulation die zugehörigen Kennzahlen sowie die Merkmale der Belastungsfälle ermittelt, sodass die Planungsentscheidungen unterstützt werden.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Simulationsanalyse werden fortlaufend in den Planungsprozess integriert. Die Produktionshalle wird den Spezifikationen entsprechend gebaut und in Betrieb genommen. Das Modell dient später als Grundlage für die Feinplanung. Es wird so ausgelegt, dass Modifikationen (z. B. Schichtmodelle, spezielle manuelle Operationen) im Produktionsplan einfach untersucht werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse sind für die Ausgangsbedingungen und dazu gehörigen Eingangsdaten gültig, bei Modifizierung z. B. der Produktstruktur müssen Änderungen im Simulationsmodell ebenfalls durchgeführt werden. Die gewonnenen Planungserkenntnisse können bei einer späteren Investition, z. B. einer automatisierten Funktionsergänzung der Materialbereitstellung für Kommissionierung oder einem Einsatz von Fahrerlosen Transportfahrzeugen, benutzt werden. Außerdem bieten die Erfahrungen eine sehr detaillierte Grundlage für die Spezifikation eines erweiterten Produktionssteuerungssystems.

Danksagung

Dieser Artikel entstand im Rahmen der 1687/2015. (IX. 25.) Verordnung der Regierung, individuelle Innovationsförderung der Széchenyi István Universität.

Literatur

- Bangso S. (Hrsg.): Use Cases of Discrete Event Simulation, Appliance and Research. Heidelberg: Springer 2012.
- Banks, J.: Handbook of Simulation, Principles, Methodology, Advances, Application and Practice. John Wiley & Sons Inc 1998.
- 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 2008.
- Curry G.L., Feldman R.M.: Manufacturing System Modeling and Analysis. New York: Springer, 2011.
- Goldhahn L.; Müller E., Müller-Eppendorfer K.: Strategie und Werkzeuge zur Planung der Materialbereitstellung für manuelle Montageprozesse. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Chemnitz 2016.
- Kühn W.: Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner. München: Carl Hanser 2006.
- Law, A.; Kelton, D.: Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill 2000.
- März L.; Krug W.; Rose O.; Weigert G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik, Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin: Springer 2011.
- Staab T.; Galka S.; Klenk E.; Günther W.A.: Effizienzsteigerung für Routenzüge – Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität. In: Simulation in Produktion und Logistik, Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2013.
- VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Grundlagen. Berlin: Beuth 2010.

Simulationsgestützte Entwicklung einer innovativen Fertigungssteuerung

Simulation-based Development of an Innovative Manufacturing Control

Mathias BöS, SDZ GmbH, Dortmund (Germany),
mathias.boes@sdz.de

Abstract: This report describes the development of an innovative manufacturing control. By means of simulation the bottle-necks as well as the reasons for production losses are identified. Through identification of connection of different product and machine restrictions a logic for manufacturing control can be developed and secured by simulation.

1 Motivation

Die (deutsche) Automobil-Zulieferindustrie steht in einem internationalen Wettbewerb, der sich in den kommenden Jahren noch weiter verschärfen wird. Denn weltweit werden weiterhin Fertigungskapazitäten aufgebaut, die mit wachsendem Know-how betrieben werden. In Folge können Original Equipment Manufacturers (OEM) vergleichbare Qualitäten weltweit beziehen, wodurch sich der Kostendruck auf heutige Lieferanten noch weiter erhöht.

Auch mittelständische Unternehmen sind so gezwungen, ihre Fertigung noch effizienter zu gestalten und die Produktivität ihrer Fabriken weiter zu steigern. Dies erfolgt durch eine fortgesetzte Automatisierung der Fertigungsabläufe und die Eliminierung (bzw. Reduzierung) weiterer Kostenfaktoren in den Fabriken (z. B. durch die Minimierung von Beständen auf allen Lagerstufen).

Dies hat zur Folge, dass die Abläufe innerhalb dieser Fabriken (von der Vor- über die Haupt- bis zur Endfertigung) immer stärker verkettet sind und nur noch minimale Sicherheiten für deren Entkopplung bestehen. Die Komplexität innerhalb dieser Fabriken erschließt sich niemandem mehr, kein Verantwortlicher verfügt mehr über ein Verständnis für das resultierende Betriebsverhalten dieser Systeme. Durch die Automatisierung bestehen zudem Grenzleistungen, die im Bedarfsfall nicht mehr durch mehr Manpower erweitert werden können. Aus diesem Grund schlagen dynamische Effekte unmittelbar und voll durch und führen zu Kapazitätsverlusten und Produktionseinbußen.

2 Ausgangssituation

Verantwortlich ist dafür die Tatsache, dass die Fertigungssteuerung bei der Modernisierung der Fertigung vernachlässigt wird. Dies betrifft sowohl die Entwicklung der entsprechenden Strategien der Fertigungssteuerung als auch die Implementierung geeigneter IT-Systeme (BMBF 2015). Denn obwohl Millionen in die technische Ausstattung der Fabriken gesteckt werden, werden keine adäquaten Mittel bereitgestellt, um auch die Produktionsplanung und Fertigungssteuerung auf den aktuellen Stand der Technik zu bringen und zu digitalisieren. In Folge steuert jeder Fertigungsbereich seine Tätigkeiten autonom auf herkömmliche Weise, also manuell und gemäß Prioritäten (Lödding 2015). Letztere werden permanent auf bidirektionalem Weg geändert, meistens durch direkten Kontakt zu Planungs- bzw. Steuerungsverantwortlichen in der Fertigung.

Eine Synchronisation aller Bereiche erfolgt dagegen in weitaus geringerer Frequenz als dies innerhalb der digitalisierten Lieferketten notwendig wäre. So wird in vielen Unternehmen noch eine wöchentliche Produktionsplanung durchgeführt, an der alle Unternehmensbereiche (Fertigung, Vertrieb, Beschaffung, Versand) beteiligt sind. Ergänzt wird diese durch eine einmalige tägliche Synchronisation aller Fertigungsbereiche, selbst bei einem Mehrschichtsystem. Diese Art der Fabriksteuerung ist allerdings viel zu träge, um anforderungsgerecht auf die dynamischen Schwankungen innerhalb der Lieferketten reagieren zu können (Spath et al. 2008).

Dabei kann oft bereits mit einfachen Mitteln Abhilfe geschaffen und die notwendige Reaktionsfähigkeit auf dynamische Einflüsse erreicht werden. So unterstützen individuelle, passgenau entwickelte Methoden eine flexible Fabriksteuerung und steigern deren Produktivität (Westkämper et al. 2009). Diese ermöglichen ein zielgerichtetes Handeln bei kurzfristigen Änderungen.

Zugegebenermaßen ist die Aufgabe, solche Methoden zu entwickeln, nicht ganz einfach. Die Konzeption derartiger Methoden setzt häufig ein Querdenken voraus und erfordert mutige und kreative Ideen abseits der herkömmlichen Wege.

Notwendige Voraussetzung ist in jedem Fall ein genaues Verständnis des Betriebsverhaltens der Fabrik, sowohl im Regelbetrieb als auch in Sonderfällen (Denkena und Schmidt 2015). Die Simulation unterstützt dabei, dieses Betriebsverhalten zu verstehen und Zusammenhänge unterschiedlicher Einflussgrößen zu ermitteln. Durch die Simulation kann auch die erreichbare Systemleistung (gemeint ist damit der tatsächliche Output, nicht die installierte technische Leistung) ermittelt werden. So wird durch die Simulation transparent, in welchen Betriebssituationen Leistungsverluste drohen und wie diesen entgegen gewirkt werden können.

Ein solches Systemverständnis bietet das (notwendige) Fundament, um individuelle Lösungen zu entwickeln, ausgerichtet auf die Anforderungen des Marktes und der Unternehmensstrategie sowie unter Berücksichtigung der Anforderungen aller Beteiligten (Kürzel 2015). Damit ist keine grundsätzliche Forderung nach Umsetzung aller Innovationen von Industrie 4.0 verbunden. Aber eine IT-gestützte Planung, die in eine Digitalisierungsstrategie eingebunden ist, ist heutzutage unumgänglich.

3 Beschreibung des Anwendungsfalls

Dieser Beitrag greift diese Thematik auf und beschreibt ein Vorgehen aus der Praxis, bei dem mittels Simulation eine solche Methodik entwickelt wurde. Es handelt sich um einen Anwendungsfall bei einem Automobilzulieferer, der Teile für die Erstausrüstung von Fahrzeugen liefert. Die Teile werden in einem Variantenmix gefertigt, der sich an den Kundenbedarfen orientiert. Bei den Teilen handelt es sich um Aluminiumdruckgussteile. In einem mehrstufigen Herstellungsprozess werden diese Teile gegossen, thermisch behandelt, mechanisch weiterbearbeitet und abschließend (teilweise) veredelt. Diese Fertigungsschritte sind direkt über Förder-technik miteinander gekoppelt. Während der Materialfluss automatisch gesteuert wird, ist für die Fertigungssteuerung kein IT-basiertes System implementiert.

Gegenstand der Betrachtung sind die Fertigungsstufen vom Gießen bis zur mechanischen Bearbeitung (vgl. Abb. 1). Diese sind miteinander gekoppelt. Mittels einer Automatisierung werden die Teile direkt (inline) von einem Fertigungsschritt zum nächsten transportiert. Die Kapazitäten je Fertigungsstufe sind aufeinander abgestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Fertigungszeiten je Fertigungsstufe sind in jeder Stufe unterschiedliche Kapazitäten (Anlagen) installiert.

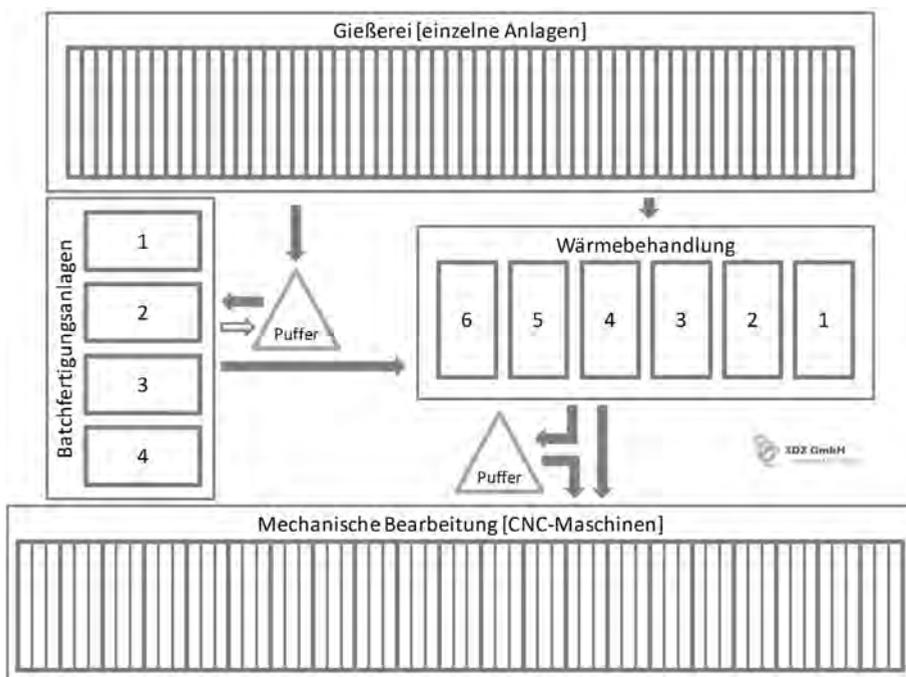


Abbildung 1: schematische Darstellung der Fabrik

Die existierende Fabrik erreicht nicht die vorgesehene Leistung (Anzahl produzierter Teile), die aufgrund der installierten Technik zu erwarten wäre. Die Gründe für die Einbußen bei der Systemleistung sollen mittels einer Materialflusssimulation ermittelt werden.

4 Simulationsmodell

Im Simulationsmodell werden die Abläufe der Fertigung von der Gießerei bis zur mechanischen Bearbeitung abgebildet. Der Schwerpunkt der Simulation liegt auf den Fertigungskapazitäten und den automatisierten Materialflüssen (Fördertechnik) innerhalb dieses Bereichs. Dazu werden die Kapazitäten aller Fertigungsstufen (Gießerei, Batchfertigungsanlagen, Wärmebehandlung, mechanische Bearbeitung) modelliert. Berücksichtigt werden dabei alle Einflussfaktoren, welche sowohl die Fertigungskapazität als auch den Materialfluss beschränken (Wenzel et al. 2008). Dabei handelt es sich um Rüst- und Einrichttätigkeiten an den Maschinen sowie um Störungen. Für die Verkettung aller Anlagen und Maschinen wird die Fördertechnik abgebildet, über die die Teile von einem Fertigungsschritt zum nächsten transportiert werden. Insgesamt befinden sich bis zu rund 60.000 Teile in diesem Fertigungsbereich.

Als Simulationsmethode wird die ereignisdiskrete Simulation gewählt. Die Abbildung erfolgt auf Basis des praxiserprobten Simulationsprogramms DOSIMIS-3. Das Simulationsprogramm verfügt über eine umfangreiche Bausteinbibliothek, die eine schnelle und valide Modellierung ermöglicht. Im Gegensatz zu vielen anderen Simulationsprogrammen erfolgt die Modellierung in DOSIMIS-3 ohne Programmierung, so dass auch technisch orientierte Anwender (z. B. Ingenieure, Planer) die Simulation durchführen können.

Jede Anlage und Maschine wird mit ihren spezifischen Kennwerten (Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten, Materialtransportzeiten) abgebildet (VDI 2010). Dies umfasst auch deren Kapazität, da einige Anlagen über mehr als einen Bearbeitungsplatz verfügen. Über ein Schichtmodell kann die Verfügbarkeit der Anlagen eingeschränkt werden. Für jede Maschine kann in DOSIMIS-3 zudem ein individuelles Störprofil vorgegeben werden. Die Fördertechnik wird gemäß Layout abgebildet und jede Komponente (Strecken, Drehtische, Heber, usw.) mit den spezifischen Kennwerten (u.a. Geschwindigkeit, Kapazität) abgebildet. Puffer werden im Simulationsmodell nur grob abgebildet, um für jeden Simulationslauf die Bestandsverläufe jedes Puffers ausweisen zu können.

In Abbildung 2 (vgl. 3) ist der prinzipielle Fertigungsablauf dargestellt. In der Fabrik werden rund 550 unterschiedliche Teiletypen (Produkte) hergestellt. Jedes Produkt verfügt über spezifische Eigenschaften (z. B. Größe, Oberfläche, Werkstoff bzw. Legierung), die bei der Fertigung berücksichtigt werden müssen. So gibt es Produkte, die mit bzw. ohne Batchfertigung produziert werden. Darüber hinaus gibt es weitere produkt- und fertigungsbedingte Einschränkungen je Fertigungsstufe, die bei der Steuerung der Teile berücksichtigt werden müssen. In der Simulation werden für jedes Produkt zudem spezifische Zeiten (Bearbeitung, Rüsten) für jeden Fertigungsschritt berücksichtigt. Allerdings sind diese Zeiten für unterschiedliche Produkte bei gleichen Eigenschaften auch gleich, wodurch der Umfang zu verwaltender Daten in der Simulation erheblich reduziert wird.

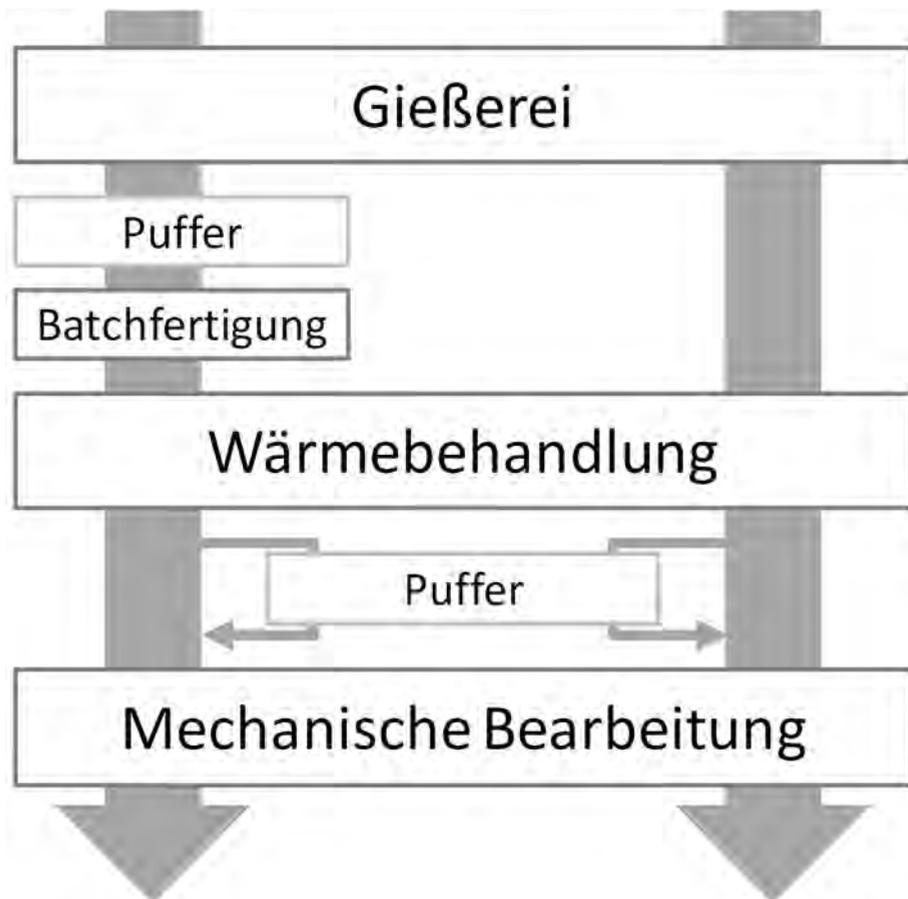


Abbildung 2: prinzipielle Fertigungsabläufe

Grundlage der Simulation sind Fertigungsaufträge. Diese definieren das Produkt und seine Losgröße. Die Fertigungsreihenfolge (Produktionsplanung) wird nicht direkt im Simulationsmodell abgebildet, sondern vorab generiert. Die Produktionsplanung erfolgt wochenweise und basiert auf den Vorgabemengen je Woche. Die herzustellenden Teile werden dazu in Fertigungsaufträgen zusammengefasst. Diese Aufträge werden einzelnen Anlagen zugeordnet, wozu die Restriktionen der jeweiligen Produkte und der Anlagen zu berücksichtigen sind (vgl. Abb. 3 (3)). So ergibt sich ein Wochenplan für die Gießerei. Die übrigen Anlagen werden nicht geplant. Die Batchfertigung erfolgt, wenn sich mehrere Batches zur Bearbeitung im Puffer (vor der Anlage) befinden. Bei den Anlagen der Wärmebehandlung handelt es sich um kontinuierlich betriebene Durchlauföfen, die nicht geplant werden müssen.

Etwas komplexer ist dagegen die Fertigungssteuerung der mechanischen Bearbeitung. Grundsätzlich sollen die Maschinen inline betrieben werden. Teile, die aus der Wärmebehandlung kommen, werden dazu direkt zu einer Maschine transportiert. Dazu wird bei der Zuführung des ersten Teils eines Fertigungsauftrages eine Maschine ausgewählt, auf der dieser Auftrag bearbeitet werden soll.

Da in der mechanischen Bearbeitung mehr Maschinen als Gießanlagen installiert sind, müsste eigentlich immer eine Maschine verfügbar sein.

Allerdings bestehen auch Einschränkungen für die Maschinenzuordnung in der mechanischen Bearbeitung, da nicht jedes Produkt auf jeder Anlage gefertigt werden kann. Ggf. müssen Maschinen dazu gerüstet werden. Durch die Simulation kann aufgezeigt werden, dass diesbezüglich ein Problem im Konzept der Inline-Fertigung besteht. Zwar kann im Prinzip dies Rüsten frühzeitig erfolgen, da aufgrund der Produktionsplanung der Gießplan bekannt ist. Da dieser jedoch kurzfristig aufgrund ungeplanter Lieferabrufe der Kunden immer wieder geändert werden muss, steht bei der Ankunft des ersten Teils eines Auftrages häufig keine (fertig gerüstete) Maschine zur Verfügung. Die zugeführten Teile stauen sich auf (bis das Rüsten beendet ist) und behindern dadurch auch die Zuführung von Teilen zu anderen Maschinen. In kürzester Zeit (vor jeder Maschine ist nur ein wenige Teile umfassender Puffer vorhanden) steht die gesamte mechanische Bearbeitung.

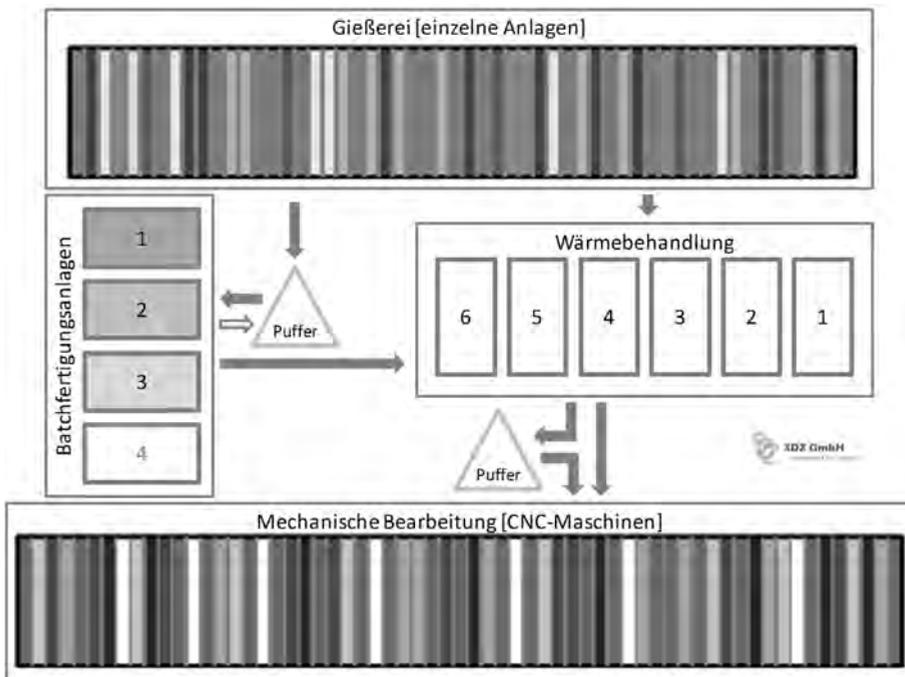


Abbildung 3: grafische Darstellung von unterschiedlichen Anlageneigenschaften

Um dieser Gefahr zu entgehen werden Teile, die nicht inline gefertigt werden können, dem Puffer vor der mechanischen Bearbeitung zugeführt und dort zwischengelagert. Durch die Simulation können so existierende Engpässe im Materialflusskonzept identifiziert werden, die in Folge zu Unterbrechungen des gesamten Materialflusses bzw. in Extremsituationen zu Deadlocks geführt haben. Das gleiche Problem kann (in noch weitaus stärkerem Ausmaß) zudem bei Störungen von Anlagen innerhalb der mechanischen Bearbeitung nachgewiesen

werden sowie bei Zuordnungsproblemen von Teilen (neuen Fertigungsaufträgen) zu Anlagen innerhalb dieses Bereichs.

Letztere begründen sich durch bestehende Restriktionen in Bezug auf die Zuordnung von Varianten zu einzelnen Anlagen, sodass für die Fertigungssteuerung eine wahlfreie Zuordnung von Fertigungsaufträgen zu Anlagen nicht möglich ist. In der Gießerei müssen vorgegebene Restriktionen (in Bezug auf den Mix von Legierungen und Kokillen) berücksichtigt werden und in der mechanischen Fertigung kann nicht jede Variante auf jeder Anlage gefertigt werden. Daher wird wochenweise auf Grundlage der (zu diesem Zeitpunkt bekannten) Abrufplanung der Kunden ein Produktionsplan erstellt, wofür die Restriktionen aller Fertigungsbereiche ebenso berücksichtigt werden wie das Konzept der Inline-Fertigung. Hierbei werden auch planbare Produktionsunterbrechungen (Instandhaltung, Rüst- und Einrichtzeiten) berücksichtigt.

Schwieriger ist dagegen die Fertigungssteuerung im Falle von nicht planbaren Ereignissen, wie technischen Störungen oder kurzfristig übermittelten Änderungen der Kundenabrufe. In diesem Fall erfolgt (aufgrund der verfügbaren Zeit) lediglich eine Umplanung im Bereich des Gießens durch die Fertigungssteuerung, ohne dass mögliche Restriktionsverletzungen in der mechanischen Fertigung überprüft werden (können). Letztere wird auch nicht unmittelbar über vorgenommene Änderungen informiert, sondern erfährt diese häufig erst, wenn die ersten, abweichend gegossenen Teile (Wechsel von Fertigungsaufträgen) der mechanischen Fertigung zugeführt werden.

Restriktionsbedingt führt dies dazu, dass Teile in der mechanischen Bearbeitung nicht bearbeitet werden können und zunächst zwischengelagert werden müssen. Dies führt zu einer Reduzierung der Produktionsleistung und in Folge zu Lieferverzögerungen und resultierenden Versorgungsabbrissen des Kunden.

5 Lösungskonzept

Durch die Simulation können die diesbezüglichen Zusammenhänge für die messbaren Produktionseinbußen ermittelt und aufgezeigt werden. Insbesondere kann nachgewiesen werden, dass bei kurzfristig erforderlichen Änderungen des Produktionsplans (Gießplans) zu wenig Rücksicht auf die Restriktionen der mechanischen Bearbeitung genommen werden. Auch die Steuerung der Batchfertigung orientiert sich in keiner Weise an diesen Restriktionen, führte zu einem nicht verfügbaren Kapazitätsbedarf in der mechanischen Bearbeitung und wird diesem Fertigungsbereich zudem mit einem viel zu kurzen Vorlauf bekanntgegeben. All diese Faktoren führten zu den vorab beschriebenen Effekten.

Um eine Lösung zu entwickeln, werden unterschiedliche Simulationsläufe durchgeführt. Bei deren Analyse werden Situationen identifiziert, in denen der Auftragswechsel übergangslos (inline) erfolgt bzw. Situationen, in denen eine Entkopplung erforderlich ist. Bei genauerer Analyse dieser Situationen wird ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der grundsätzlich für ein Produkt gerüsteten Anlagen und der Anzahl gleichzeitig gefertigten Produkte ermittelt. Des Weiteren schwankt der Fertigungsbedarf der Produkte pro Woche, wobei weder Schwankungsbreiten noch die Anzahl nicht prognostizierbarer Abrufschwankungen innerhalb einer Woche festgelegt werden können.

Allerdings wird identifiziert, dass Produkte zu Produktgruppen zusammengefasst werden können, die wöchentlich recht gleichmäßige Kapazitätsbedarfe erfordern. Jeder Produktgruppe kann eine definierte Anzahl an Maschinen zugewiesen werden. Als optimale Konfiguration wird ermittelt, dass jeweils Produkte mit 2-3 unterschiedlichen Größenabmessungen zu einer Produktgruppe zusammengefasst werden. Durch den Einsatz flexibler Bohrfutter (geringfügige Investition) können diese Maschinen sehr schnell auf die unterschiedlichen Produkte der jeweiligen Produktgruppe umgerüstet werden. Dies ermöglicht eine wahlfreie Auswahl einer Maschine innerhalb einer Maschinengruppe. Basierend auf dieser Erkenntnis wird so eine Grundkonfiguration definiert (Rahmenbelegungsplan, vgl. Abb. 4), durch die die Maschinen einzelnen Produktgruppen zugeordnet werden.

MB	MaxAufträge	MaxProdukte	Merkmal 1	Merkmal 2	MinGröße	MaxGröße	14	15	16	17	18	19	20	21
1	3	1	0	0	15	15	0	1	0	0	0	0	0	0
2	3	1	0	0	15	15	0	1	0	0	0	0	0	0
3	3	1	0	0	16	16	0	0	1	0	0	0	0	0
4	3	1	0	0	16	16	0	0	1	0	0	0	0	0
5	3	1	0	0	16	16	0	0	1	0	0	0	0	0
6	3	1	0	0	17	17	0	0	0	1	0	0	0	0
7	3	1	0	0	17	17	0	0	0	1	0	0	0	0
8	3	1	0	0	17	17	0	0	0	1	0	0	0	0
9	3	1	0	0	18	18	0	0	0	0	1	0	0	0
10	3	1	0	0	18	18	0	0	0	0	1	0	0	0
11	5	1	0	0	18	18	0	0	0	0	1	0	0	0
12	5	1	0	0	18	18	0	0	0	0	1	0	0	0
13	5	2	0	0	18	18	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
14	5	2	0	1	18	19	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
15	5	3	1	1	16	16	0	0	1	0	0	0	0	0
16	5	3	1	1	17	17	0	0	0	1	0	0	0	0
17	5	3	1	1	17	17	0	0	0	1	0	0	0	0
18	5	3	1	1	18	19	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
19	5	3	1	1	18	19	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
20	5	3	1	1	19	21	0	0	0	0	0	0,333	0,333	0,333
21	5	3	1	1	19	21	0	0	0	0	0	0,333	0,333	0,333

gpa: 0,00 2,00 3,00 5,00 5,00 2,67 0,67 0,67

Abbildung 4: Rahmenbelegungsplan für Fertigungssteuerung

Beim Rahmenbelegungsplan handelt es sich im Grunde um ein Korsett für eine manuelle Kapazitätsplanung. So können anhand der Auftrags-/Produktmerkmale die Maschinen identifiziert werden, auf denen der Auftrag / das Produkt gefertigt werden kann (weil diese Maschine aktuell für dieses Produkt gerüstet ist). Wenn eine geeignete Maschine belegt ist, kann auf eine alternative ausgewichen werden. Wenn keine geeignete Maschine mehr zur Verfügung steht, kann der Auftrag zum geplanten Zeitpunkt nicht gefertigt werden. Der Rahmenbelegungsplan sollte jedoch wöchentlich auf Basis der erwarteten Lieferabrufe neu berechnet werden.

Wenn nun bei der Produktionsplanung (Tagesplanung) und der Fertigungssteuerung (Umplanung) zu jeder Zeit immer nur so viel Produkte einer Maschinengruppe vorgesehen werden, wie dieser Produktgruppe Maschinen zugeordnet sind, wird eine vollständige Synchronisation des gesamten Fertigungsbereichs erreicht, die auch eine Inline-Fertigung ermöglicht. Denn wenn bei der Planung der Gießereibelegung diese Restriktionen berücksichtigt werden, findet jeder Fertigungsauftrag auch in der mechanischen Fertigung eine freie Maschine, auf der er bearbeitet werden kann. Diese Methodik berücksichtigt auch die Batchfertigung. Wenn auch diese mit dem Rahmenbelegungsplan synchronisiert wird, kann diese Fertigungsstufe jederzeit

durchgeführt werden, ohne dass die übrigen Fertigungsbereiche eingeschränkt werden. Optimal wäre jedoch ein kontinuierlicher und nicht diskontinuierlicher Betrieb auch dieses Fertigungsbereiches, was aber auch ein kontinuierliches Gießen und mechanische Bearbeiten dieser Produkte erfordert.

Eine hundertprozentige Inline-Fertigung der mechanischen Bearbeitung wird allerdings aufgrund von Zeitanteilen für Qualitätsprüfungen und Anlagenstörungen verhindert und erfordert ein dynamisches Puffern von Rädern. Auch die Begrenzung von Unterwegsbeständen (Füllstandskontrolle) führt bei nicht planbaren Einflüssen zu temporären Entkopplungsbedarfen. Ein Mindestmaß an Entkopplung ist daher auch für eine Inline-Fertigung notwendig und erfordert ein Pufferlager. Dies heute noch manuell betriebene Lager kann zukünftig durch ein automatisches Lager effizienter gestaltet werden.

Abschließend bleibt noch zu bemerken, dass auch die Engpässe der Fördertechnik innerhalb der Fertigung durch die Simulation analysiert wurden. So ist die installierte Förderleistung grundsätzlich ausreichend dimensioniert. Lediglich im Bereich der Zusammenführung von Wärmebehandlung und manuellem Lager kommt es aufgrund kreuzender Materialflüsse zu hohen Auslastungen, insbesondere in Phasen hoher Ein- und Auslagerung von Rädern im Lager. Diese können zu einer Einschränkung der Inline-Fertigung führen und zusätzliche Entkopplungskapazitäten zur Folge haben. Auf Basis der Ergebnisse der Simulation wurde ein Vorschlag für ein Re-Engineering dieses Bereiches entwickelt und abgesichert.

6 Zusammenfassung

Der hier vorliegende Beitrag zeigt die Möglichkeit der Simulation, einfache, operative Methoden für die Fertigungssteuerung zu entwickeln und abzusichern. Durch die Simulation kann zunächst die Grenzleistung der Fabrik ermittelt werden und der Einfluss leistungseinschränkender Restriktionen. So kann aufgezeigt werden, dass die mechanische Fertigung bei einer ungestörten Inline-Fertigung nur zu maximal 89 % ausgelastet wird und damit grundsätzlich über die notwendige Kapazität verfügt, um die gegossenen Teile zu bearbeiten.

Durch fertigungs- und maschinenbedingte Restriktionen kommt es bei ‚falschen‘ Produktmischen zu Kapazitätseinschränkungen in der mechanischen Bearbeitung. Durch eine einfache Planungsmethodik können ‚falsche‘ Produktmische jedoch in jeder Situation durch die Fertigungssteuerung vermieden werden. Wenn jeder vorgesehene Produktmix vorab anhand einer Rahmenbelegungsplanung geprüft wird, ist die Synchronisation der gesamten Fabrik sichergestellt (solange keine technischen Störungen die verfügbaren Kapazitäten einschränken). Es kann inline produziert werden und Pufferbestände (WIP) werden vermieden. Dies erfolgt ohne eine Begrenzung der (täglich) benötigten Flexibilität (in Bezug auf die Lieferabrufe), bietet aber gleichzeitig Effizienzgewinne durch die Einsparung von Nebennutzungszeiten (z. B. Rüstzeiten).

Die Idee liegt in der Zusammenfassung von Produkten und in der Definition von adäquaten Maschinengruppen für diese Produktgruppen. Der so entwickelte Rahmenbelegungsplan kann wöchentlich im Rahmen der Produktionsplanung an den prognostizierten Fertigungsbedarf angepasst werden. Wenn dessen Anwendung für die Fertigungssteuerung in jedem Bereich sichergestellt ist, können Produktions-

einbußen weitgehend eingeschränkt werden, sowie die Ausbringungsmenge (Stückzahl) und die Produktivität gesteigert werden.

Die Inline-Fertigung ist jedoch grundsätzlich vor dem Hintergrund der kurzfristig bekanntgegebenen Lieferabrufe und der daraus resultierenden Änderungen der Fertigungsplanung zu überdenken. Eine Entkopplung (Lager) würde hier die Möglichkeit bieten, noch schneller auf geänderte Abrufmengen reagieren zu können. Dazu muss das Lager mit definierten Reichweiten an Halbfertigware (HALB) betrieben werden, aus denen sich die mechanische Bearbeitung bedienen könnte. Dies umfasst auch die Möglichkeit, kurzfristig und parallel auf mehr als einer Anlage ein dringend benötigtes Rad zu bearbeiten. Die Lagerung von HALB kann sich dabei auch auf wenige Radtypen (z. B. A-Artikel) beschränken, die bedarfsorientiert (gemäß Prognose) vorgehalten werden.

Zu empfehlen ist darüber hinaus die Implementierung einer regelbasierten, IT-gestützten Produktionsplanung und Fertigungssteuerung, um eine synchronisierte Zusammenarbeit von Gießerei und mechanischer Bearbeitung zu gewährleisten. Diese basiert auf den in diesem Beitrag vorgestellten Regeln der Produktionsplanung und Fertigungssteuerung und kann dadurch auch automatisiert werden (VDI 2000).

Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Bildung und Forschung: Industrie 4.0, Innovationen für die Produktion von morgen, BMBF (Bonn) 2015.
- Denkena, B., Schmidt, J.: Integrierte Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung auf Basis von Zustandsinformationen. Garbsen: PZH 2015.
- Kürzel, A.: Produktionssystem, Fertigungssteuerung, Toyota und Kata: durch Konsequenz zur Exzellenz. Books on Demand 2015.
- Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Berlin, Heidelberg: Springer 2015.
- Spath, D.; Hirsch-Kreinsen, H.; Kinkel, S.: Organisatorische Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008.
- 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.
- Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Aldinger, L.A.: Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes. Heimsheim: Joseph-Jetter 2009.

Simulationsgestützte Entscheidungsunterstützung für das Produktionsmanagement einer Verzinkerei

Simulation-based Decision Support for the Production Management of a Galvanizing Plant

Michael Richter, Rolf Glaser, Seppeler Gruppe, Rietberg (Germany),
michael.richter@seppeler.de, rolf.glaser@seppeler.de

Ulrich Jessen, Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany),
jessen@uni-kassel.de, s.wenzel@uni-kassel.de

Abstract: This paper describes a practical application of the discrete event simulation for the short-term production planning and control in a hot-dip galvanizing plant. The production structure consists of a number of restrictions and mutual dependencies. The production lines are closely coupled and can be divided in rigging the product carrier, the surface preparation, the galvanizing, the post-treatment and stripping down the product carrier. The management is responsible for the order sequence of the production regarding the short-term planning decisions that are made on a daily basis. The difficult aspect is the short time of max. 48 hours for the planning, between the point to get the planning information (incoming inspection) and the delivery date. Therefore, we bring together discrete event simulation and operational cost accounting to get estimated and optimized alternatives for a decision support.

1 Ausgangssituation und Problemstellung

Das Produktionsmanagement von effektiven und effizienten Feuerverzinkungsunternehmen trifft täglich Entscheidungen bezüglich der Reihenfolge der zu verzinkenden Aufträge und des Personaleinsatzes. Durch die Fixkostendegression und den ständigen Wettbewerbsdruck arbeitet das Personal häufig an der Fertigungskapazitätsgrenze. Neben der begrenzten Personalkapazität für die Produktion basiert eine tägliche bzw. kontinuierliche Planung in der Feuerverzinkerei ähnlich der in einer Industriewäscherei auf unsicheren Angaben und dem Erfahrungswissen, „[...] was zu aufwändigen Umplanungen im operativen Betrieb führt“ (Brandau et al. 2015, S. 290). Darüber hinaus birgt die Zukunft Ungewissheit über marktwirtschaftliche Tendenzen und Kräfte, auf deren Einfluss sich gewinnorientierte Unternehmen einstellen müssen. Daher ist es für Unternehmen umso wichtiger, vorhandene Potenziale zu nutzen, um gewinnmaximierend zu wirtschaften und Ressourcen auszu-schöpfen (vgl. Kotler und Bliemel 2001, S. 1). Auch Feuerverzinkereien sind bestrebt,

die Produktion den aktuellen Anforderungen anzupassen, um einen optimalen Durchsatz bei hoher Qualität und niedrigen Kosten zu generieren. Betriebswirtschaftliche Analysen und Bewertungen nehmen dabei eine zunehmend wichtige Rolle ein.

In Stückverzinkereien erhalten Stahlkonstruktionen durch Eintauchen in ein 450 °C heißes Zinkbad eine Eisen-Zinklegierung als Korrosionsschutz (vgl. Huckshold und Peißker 2016, S. 103). In einer Verzinkerei, einem zumeist regional agierenden Unternehmen, unterliegt die operative Planungsarbeit unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen folgender Problemstellung:

- Durch die Heterogenität in der Kunden- und Produktstruktur wird eine vielfältige Anzahl von Stahlprodukten bzw. Stahlkonstruktionen zur Verzinkung angeliefert.
- Für eine optimale Auftragsreihenfolgeplanung bedarf es frühzeitiger Angaben über Menge, Oberflächenzustand, Materialspezifikationen und Dimensionsangaben der zu verzinkenden Produkte. Die Angaben liegen in der Regel jedoch erst nach erfolgter Wareneingangskontrolle vor.
- Die Verweildauer in den Vorbehandlungsbädern sowie den nachgelagerten Arbeitsschritten ist aufgrund der Materialspezifikation und des Oberflächenzustandes nur bedingt beeinflussbar und unterliegt strengen Restriktionen.
- Durch feste Tourendienste sowie die strategische Ausrichtung, eine Verzinkungsleistung innerhalb kürzester Zeit durchzuführen, wird eine Vielzahl der angelieferten Produkte direkt in die Produktion eingebracht.
- Auf die sich täglich ändernde Aufgabenstellung in der wöchentlichen bzw. täglichen Produktionsplanung zu reagieren und einen optimalen Produktionsablauf unter Berücksichtigung der betriebswirtschaftlich relevanten Kostengesichtspunkte sicherzustellen, stellt für das Produktionsmanagement eine Herausforderung dar.

Im Rahmen des Beitrags wird zunächst der Produktionsablauf unter Berücksichtigung des Produktspektrums vorgestellt. Ergänzend werden Anforderungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht an die operative Entscheidungsunterstützung für Feuerverzinkungsunternehmen als Zielsetzung der Ablaufsimulation beschrieben. Darauf aufbauend werden die Vorgehensweise bezüglich Vorbereitung und Prozessaufnahme als Grundlagenarbeit geschildert, die ersten Schritte zur Generierung der Lösungsarchitektur zur operativen Entscheidungsunterstützung und zum betriebsbegleitenden Einsatz vorgestellt und die Grenzen des bestehenden Simulationsmodells aufgezeigt. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten schließen den Beitrag ab.

2 Feuerverzinkungsunternehmen: Produktionsprozess und Produktspektrum

Die Branche der Feuerverzinkungsindustrie umfasst ca. 150 ausschließlich kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) mit ca. 4.800 Beschäftigten. Die Verzinkereien bedienen ein heterogenes Kundenspektrum, das sich vom klassischen Hallenbauer über Sondermaschinen- und Stahlbauer bis hin zum kleinen Schlosserunternehmen erstreckt. Die Vielfalt der zu verzinkenden Stahlprodukte reicht von der Unikatfertigung bis hin zur Serienfertigung bzw. Losfertigung. Die Grenzen der Möglichkeiten des Feuerverzinkens von Stahlkonstruktionen werden allein durch die Abmessungen der Tauchbäder vorgegeben. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von

verschiedenen Produkten mit unterschiedlichen Anforderungen an die Verarbeitung und das Handling sowie an die logistischen Abläufe (Industrieverband Feuerverzinken 2017). Der Verfahrensablauf des Stückverzinkens (vgl. Abb. 1) beinhaltet einen Vorbehandlungsbereich mit Entfettungs- (6), Spül- (7), Salzsäure- (8), Spül- (9) und Fluxbad (11), den Trocknungsbereich mit dem Trocknungs-ofen (12) und den Verzinkungsbereich mit dem Zinkbad (14). Die in diesen Bereichen ablaufenden Kernprozesse sind häufig automatisiert (vgl. Huckshold und Peißker 2016, S. 164 ff.). Die vor- und nachgelagerten Prozessschritte, wie z. B. das Auf- und Abrüsten eines Warenträgers, erfolgen in der Regel manuell.

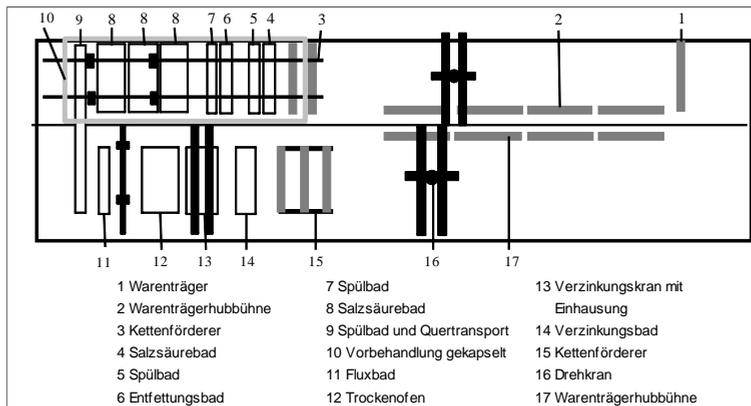


Abbildung 1: Vereinfachtes Anlagenlayout eines U-förmigen Durchlaufs in der Feuerverzinkung in Anlehnung an Huckshold und Peißker 2016, S. 80

Zur Bewertung und Einordnung in den Produktionsablauf werden die Produkte nach dem Eintreffen in dem Verzinkungsbetrieb verschiedenen Warengruppen zugeordnet. Über die Zuordnung der Warengruppen werden die für den Verzinkungsprozess notwendigen Prozessparameter definiert.

3 Betriebswirtschaft und operative Entscheidungsunterstützung in Feuerverzinkungsunternehmen

Der Gegenstand der Betriebswirtschaftslehre ist „[...] die Analyse ökonomischer Transaktionen in Organisationen [...]“ (Corsten 2007, S. 22 ff.). In einem Feuerverzinkungsunternehmen nimmt der Wertschöpfungsprozess als Schwerpunkt für betriebswirtschaftliche Auswertungen einen hohen Stellenwert ein. Der Erfolg von Unternehmensaktivitäten industrieller Produktionen kann neben den ökonomischen Zielen auch durch soziale und ökologische Ziele bewertet werden (Dyckhoff und Spengler 2010, S. 84). Auf Grundlage der Analyse ökonomischer Transaktionen werden Entscheidungen strategisch, taktisch und operativ durch das Management getroffen (vgl. Günther und Tempelmeier 2016, S. 22 ff.). Im Rahmen der nachfolgenden Ausführungen stehen die monetären bzw. ökonomischen Ziele im Vordergrund.

Zur operativen Entscheidungsunterstützung bedient sich das Produktionsmanagement unterschiedlicher ökonomischer Auswertungen aus vorhandenen Informationssystemen. Die Kosten- und Leistungsrechnung (KLR) stellt ein wichtiges Instrument für die operative Entscheidungsunterstützung dar (vgl. Labitzke 2011, S. 59). Ihre Struktur ist am Informationsbedarf des Managements eines Unternehmens festzumachen und frei gestaltbar (vgl. Ewert und Wagenhofer 2014, S. 181 ff.). Um die Komplexität und die Verzahnung der Produktionsschritte beherrschbar und monetär bewertbar zu machen, ist für die operative Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Produktionsprogrammplanung die Idee, die KLR mit der ereignisdiskreten Ablaufsimulation zu verzahnen.

In der Vergangenheit gab es ähnliche theoretische Ausführungen zu simulationsbasierten Ansätzen. In den Ausführungen von Labitzke (2011) werden Ansätze untergliedert nach simulationsbasierter Kostenrechnung und nach dynamischer Kostensimulation mit dem Fokus auf der taktischen Planungsebene aufgezeigt. Labitzke unterstreicht in seinen Ausführungen die Eignung der Teilkostenrechnung zur Entscheidungsunterstützung (Labitzke 2011, S. 87 ff.). Die VDI 3633 Blatt 7 (2001) beschäftigt sich in diesem Zusammenhang übergreifend mit der Kostensimulation. Sie gibt einen Überblick über die Verzahnung von Methoden der Kostenrechnung mit denen der Simulation. In der zurzeit in der Überarbeitung befindlichen Richtlinie wird angeführt, dass die Berücksichtigung von betriebswirtschaftlichen Aspekten zur qualitativen Verbesserung der Simulationsarbeit führt.

Um in Feuerverzinkungsunternehmen betriebswirtschaftlich produktgruppenbezogene Analysen und Auswertungen durchführen zu können, liegt es nahe, dass die Kostenträger nach der Logik der zu verzinkenden Warengruppen vergeben werden. Eine weitere, ebenfalls verbreitete Möglichkeit ist die Formulierung von Kundengruppen als Kostenträger. Eine Gliederung der Produktionskostenstellen könnte in Anlehnung an das Anlagenlayout der Feuerverzinkung nach Warenannahme, Aufrüst-, Vorbehandlungs-, Verzinkungs- und Abrüstvorgang sowie Warenausgabe vorgenommen werden. Je nach Informationsbedarf können die einzelnen Kostenstellen detaillierter oder abstrakter strukturiert werden.

4 Ablaufsimulation als Entscheidungsunterstützung für das Produktionsmanagement

Im Rahmen dieses Beitrags wird die Simulation als Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung gemäß VDI 3633 Blatt 1 (2014) verstanden. In den Ausführungen von Kuhn und Rabe (1998, S. 8) werden die Einsatzfelder der Ablaufsimulation nach dem Lebenszyklus einer Produktionsanlage aufgeführt. Im Vordergrund der nachfolgenden Ausführungen steht die Betriebsphase eines Produktions- und Logistiksystems.

4.1 Zielstellung und Anforderungen an das Simulationsmodell aus Sicht der Produktionsleitung

Die Produktionsleitung erstellt auf Grundlage der vorliegenden Daten täglich einen Produktionsplan, in dem die Reihenfolge der Auftragsabarbeitung festgelegt wird, und organisiert den dafür notwendigen Personal- und Materialbedarf. Mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation soll in diesem Zusammenhang die Plausibilität der

täglichen Planung geprüft und mögliche Engpässe aufgezeigt werden. Das Ergebnis der Simulation soll zum einen Aussagen zur Anlagenkapazitätsauslastung (Vorbehandlungs-, Trocknungs- und Verzinkungsbereich) ermöglichen und zum anderen Engpässe bei der Personaleinsatzplanung aufzeigen. Ein weiteres Ziel des Einsatzes der ereignisdiskreten Ablaufsimulation ist die Überprüfung der Produktionsorganisation unter der Maßgabe der Erhöhung des Durchsatzes bei gleichbleibender Anlagenstruktur. Hierzu sollen mit Hilfe der Simulation unterschiedliche Schichtmodelle unter wirtschaftlichen Fokus getestet und verglichen werden.

Aus Sicht der Anwender, insbesondere der Produktionsleitung, werden an das Simulationstool folgende Anforderungen zur operativen Entscheidungsunterstützung gestellt:

- Die Informationen über die zu verzinkenden Produkte müssen nach erfolgter Wareneingangskontrolle dem Simulationstool innerhalb kürzester Zeit als Dateninput zur Verfügung gestellt werden.
- Als Ergebnis eines Simulationslaufs muss der Deckungsbeitrag (DB) ausgewiesen werden. Ein Abgleich mit der KLR muss deshalb gegeben sein.
- Um die Akzeptanz seitens der Nutzer zu fördern, sollte die visuelle Darstellung des Simulationsmodells möglichst realitätsnah sein.
- Die Ergebnisse der Simulation müssen zielgruppengerecht aufbereitet und dargestellt werden.
- Das Simulationsmodell muss einfach zu handhaben sein. Dem Anwender müssen eine begrenzte Anzahl von Stellgrößen durch ein Managementcockpit zur Verfügung gestellt werden.
- Die Experimente zu Planungs- und Handlungsvarianten müssen performant durchgeführt werden.

Neben den aufgeführten Anforderungen muss die Möglichkeit gegeben sein, Wirtschaftlichkeitsberechnungen, bezogen auf den Produktionsprozess und den Warendurchlauf, durchzuführen.

4.2 Lösungsarchitektur

Auf der Basis der formulierten Ziele und Anforderungen sowie der installierten IT-Infrastruktur vor Ort in den betrachteten Produktionsanlagen wird als Rahmenwerk für die Entwicklung des Simulationsmodells die in Abbildung 2 gezeigte Lösungsarchitektur zugrunde gelegt. Diese zeigt die Integration der Simulation in das systemische Umfeld, für das nicht nur die hier genannten IT-Systeme, sondern auch die Organisationseinheiten stehen, in denen sie genutzt werden. Zur Nutzung der Simulation sind zum einen Daten aus existierenden Systemen zu exportieren und für die Simulation passend aufzubereiten und zum anderen auch die Ergebnisse der Simulation für die Weiterverarbeitung zu definierten Betriebskennzahlen zu verdichten. Als Datenquellen für die Simulation sind hier insbesondere das Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS) und die KLR als Komponenten des Enterprise Resource Planning Systems (ERP) zu nennen, das im operativen Betrieb einen Produktionsplan als Auftragslast für das Simulationsmodell bereitstellt.

Zudem liefern alle Systeme u. a. Parameterdaten für die Modellierung, z. B. aus dem Betriebsdatenerfassungssystem (BDE) vorliegenden Betriebsdaten ermittelte Leistungsdaten.

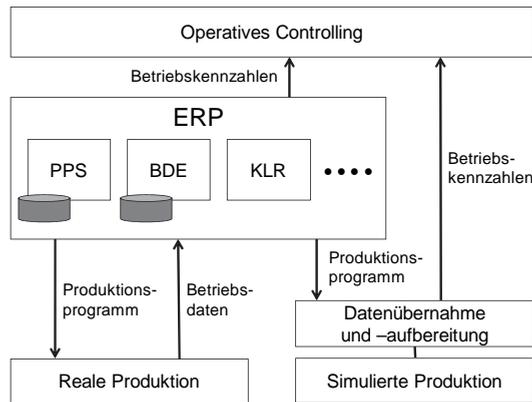


Abbildung 2: Lösungsarchitektur

Umgekehrt liefert die Simulation Ergebnisdaten, die, als Betriebskennzahlen aufbereitet, vom operativen Controlling genutzt werden. Diesem liegen bereits zum Vergleich die vom ERP-System generierten Kennzahlen, die die Abläufe der realen Produktion beschreiben, vor. So erlaubt die Architektur eine vergleichende Bewertung von realer und simulierter Produktion für einen definierten Zeitraum als Basis für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess für die Produktionsprogrammplanung.

4.3 Vorgehensweise zur Erstellung des Simulationsmodells

Die Erfüllung der formulierten Anforderungen an das Simulationsmodell aus Sicht des Produktionsmanagements ist nur mit einem schrittweisen und iterativen Vorgehen im Sinne eines agilen Projektmanagements zu erreichen, da in der Thematik des Projektes viele Unwägbarkeiten liegen und somit Herausforderungen an das Projektteam bestehen. Zu ihnen gehört unter anderem eine sinnvolle Klassifikation der Produkte, die sowohl eine ökonomische als auch eine technische Einordnung nach Produktmerkmalen erlaubt. Ausgangspunkt der Arbeiten ist eine umfassende Aufnahme der Prozesse in Feuerverzinkungsunternehmen. Als Ergebnis ist eine Prozesslandkarte entstanden, die den Ablauf der Auftragsbearbeitung anhand der Hauptprozesse (siehe Abb. 3) darstellt.

Dabei ergeben sich drei Ebenen der Bearbeitung: die Kundenauftragsebene mit den Hauptprozessen „Auftragsannahme“ und „Versandvorbereitung“, die Fertigungsauftragsebene mit den Hauptprozessen „Aufrüsten“ und „Abrüsten“, die die produktionstechnisch sinnvolle Zusammenfassung von Produkten beinhaltet, sowie die Warenträgerauftragsebene, die die Aufrüstung der Warenträger mit den in den Betriebsaufträgen zusammengefassten Produkten beschreibt, die letztendlich den Hauptprozess „Verzinkung“ durchlaufen. Als erster Schritt auf dem Weg zu einem umfassenden Simulationsmodell zur Unterstützung des operativen Betriebs in der Feuerverzinkung wird der Hauptprozess „Verzinkung“ auf der Basis der Detailprozessbeschreibungen sowie ergänzender Informationen wie Layoutpläne und Strategiebeschreibungen für den operativen Ablauf umgesetzt.



Abbildung 3: Hauptprozesse der Feuerverzinkung

4.4 Vorstellung des Simulationsmodells

Wesentliches Ziel des Simulationsmodells ist die Generierung einer Datengrundlage zur ökonomischen Bewertung von Planungs- und Handlungsvarianten mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation. Hierzu wird mit dem Simulationswerkzeug DOSIMIS-3 der SDZ GmbH, Dortmund, (SDZ GmbH 2017) ein Modell aufgebaut, das die einzelnen Schritte des Verzinkungsprozesses abbildet. Abbildung 4 zeigt die der Realität nachempfundene Anordnung der Arbeitsbereiche, die zum Hauptprozess „Verzinkung“ gehören und die die einzelnen Prozessschritte der Vorbehandlung (Entzinken, Entfetten, Beizen, Fluxen und Trocknen) sowie den technischen Vorgang des Verzinkens repräsentieren.

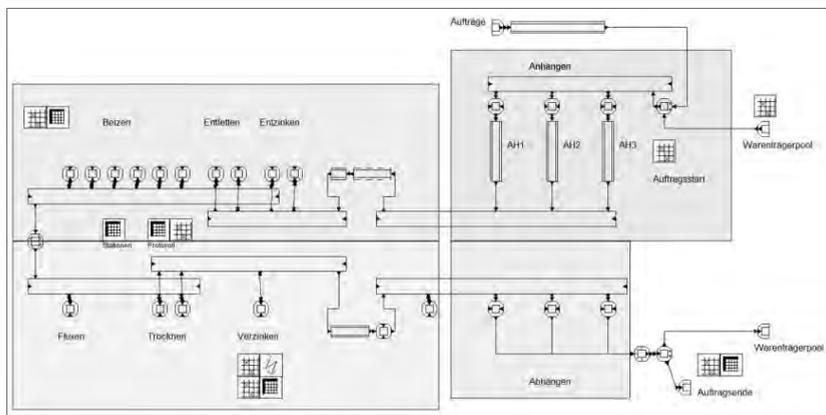


Abbildung 4: Simulationsmodell des Hauptprozesses „Verzinkung“

Die vor- und nachgelagerten Hauptprozesse „Aufrüsten“ und „Abrüsten“ sind nur soweit modelltechnisch ausformuliert, wie es zum Ablauf des Modells notwendig ist. Zur Erreichung des Simulationsziels bildet das Modell den kompletten Durchlauf eines Warenträgers durch die Produktion mit ihren einzelnen Arbeitsschritten, die im Simulationsmodell durch sogenannte Arbeitsstationen abgebildet werden. Für einen Simulationslauf wird neben Voreinstellungen der Arbeitsstationen ein bestimmter

Auftragsmix für einen Produktionszeitraum gewählt, der die jeweils an die Warenträger angehängten Produkte mit ihren produktionsrelevanten Eigenschaften festlegt. Die Bearbeitungszeiten an den Arbeitsstationen errechnen sich zum einen aus den Produkteigenschaften, zum anderen aber auch aus der aktuellen Leistung der jeweiligen Arbeitsstation, die sich während des simulierten Zeitraums ändern kann. Im Falle der Arbeitsstation „Beizen“ wird beispielsweise neben den produktionsbestimmenden Faktoren wie Temperatureinwirkung und Umwälzung des Säurebads auch die Veränderung der Säurekonzentration in Abhängigkeit von den durchgesetzten Produkten abgebildet. Hierdurch ist es möglich, zum einen die der Säurekonzentration entsprechende Bearbeitungszeit in der Simulation zu ermitteln und zum anderen auch den exakten Materialverbrauch zu bestimmen. Beide Größen sind Basis für weitere ökonomische Bewertungen der Simulationsexperimente. Die Validierung des Modells erfolgt über den Vergleich der Ergebnisse der Simulation für einen Auftragsmix, der zuvor im realen System protokolliert wurde. Hierzu erlaubt das Modell eine exakte Protokollierung des Warenträgerdurchlaufs durch die Produktion mit dem einhergehenden Materialverbrauch sowie anfallender Transport- und Standzeiten.

4.5 Ergebnisse und Defizite des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell zeigt bereits in diesem frühen Stadium eine hinreichende Genauigkeit bei der Abbildung der Abläufe im Hauptprozess „Verzinkung“. Insbesondere ist es gelungen, das dynamische Verhalten der Arbeitsstationen in Abhängigkeit der durchlaufenden Objekte, die die Warenträger mit den Produkten repräsentieren, abzubilden. Als typisches Ergebnis der Simulation werden Bearbeitungszeiten und Verbrauchskennzahlen der Arbeitsstationen bezogen auf einzelne Objekte generiert und im Anschluss monetär bewertet. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tabelle 1. Abgebildet ist eine Ergebnisstruktur untergliedert nach einzelnen Kunden bzw. anonymisiert dargestellt durch Kundennummern. Die Übersicht zeigt ein Schichtergebnis mit ausgewiesenem DB und Betriebsergebnis (BE). Zur Erreichung des Ziels, den maximalen DB zu erwirtschaften, werden unterschiedliche Varianten der Auftragsreihenfolge simuliert und gegenüber gestellt. Der Produktionsmanager erhält eine damit verbundene Übersicht der Reihenfolge zu verzinkender Aufträge strukturiert nach Warenträger. Sowohl produkt- als auch kundenabhängig stellen zum einen der Materialeinsatz und die damit verbundenen Materialkosten (MK) und zum anderen der Personalaufwand im Bereich der Aufrüst- und Abrüststationen (AuA) wesentliche Kostenpositionen dar. Die verbesserte Auftragsreihenfolgeplanung trägt dazu bei, Engpassituationen bezogen auf den Personaleinsatz in der Produktion zu vermeiden, und ermöglicht dadurch ein höheres BE. Ein wesentlicher Aufgabenschwerpunkt ist die Analyse der vorhandenen Betriebsdaten, das Erkennen von inkonsistenten oder unvollständigen Daten und die damit verbundene Datenaufbereitung zur Unterstützung der Simulation für die Feuerverzinkung. In diesem Zusammenhang ist die Klassifizierung der Aufträge, die die spezifischen Eigenschaften der Produkte in Bezug auf ihr Verhalten in der Produktion, u. a. Verweilzeiten, Zink- und Säureverbrauch, einbeziehen müssen, eine Herausforderung. Die momentane Klassifizierung der Aufträge durch das ERP-System berücksichtigt die Produkteigenschaften nur unzureichend. Letztendlich ist eine Integration in den täglichen Auftragsplanungsprozess u. a. durch die technische

Integration in die IT-Umgebung und durch eine benutzerorientierte Darstellung des Simulationsmodells zu realisieren.

Tabelle 1: Auszug – vereinfachte Schichtauswertung als Simulationsergebnis

Kundennummer	Gewicht	Umsatz	MK	Personal- aufwand für AuA	DB	BE
17.08.219	36.779 kg	11.956 €	3.714 €	6.517 €	-143 €	-710 €
17.08.212	17.068 kg	5.150 €	1.293 €	2.753 €	238 €	-25 €
17.08.287	3.464 kg	2.548 €	350 €	878 €	1.144 €	1.091 €
17.08.231	3721 kg	2.298 €	329 €	785 €	995 €	938 €
17.08.201	3.123 kg	1.346 €	276 €	681 €	231 €	183 €
17.08.277	2.552 kg	1.058 €	193 €	464 €	271 €	232 €
17.08.245	2.931 kg	982 €	259 €	596 €	-22 €	-67 €
Schichtergebnis					2.713 €	1.641 €

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine simulationsbasierte Lösungsarchitektur zur operativen Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Auftragsreihenfolgeplanung und der Personaleinsatzplanung in einem Feuerverzinkungsunternehmen vorgestellt. Ein besonderer Fokus liegt auf der Verzahnung der Betriebswirtschaft mit der ereignisdiskreten Ablaufsimulation. Mit der Simulation erhält der Produktionsmanager bzw. -planer ein Werkzeug, das ihn bei der operativen Steuerung der Produktion unter Berücksichtigung der Produktvielfalt und der Produktionsprozesse unterstützt. Dem Planungsverantwortlichen ist es dadurch möglich, Abhängigkeiten zu erkennen und zu berücksichtigen, um schneller evaluierte Entscheidungen treffen zu können. Mit Hilfe der Visualisierung der Prozessabläufe durch die Simulation erfährt die traditionelle KLR eine höhere Akzeptanz, da relevante Kosten transparent dargestellt und dadurch Engpasssituationen aufgezeigt werden. Als zukünftige Schritte ist die Einbettung des Simulationswerkzeuges in die vorhandene IT-Werkzeuglandschaft und in die operative Arbeit des Produktionsplaners zu realisieren. Das erfolgreich implementierte Simulationsmodell wird anschließend ausgerollt und damit weiteren Feuerverzinkungsunternehmen der Seppeler Gruppe zur Verfügung gestellt. Aufgrund der ähnlichen Prozessstrukturen der Feuerverzinkung in den einzelnen Unternehmen können hierbei Synergien bezüglich der Lösungsarchitektur und der Struktur des Simulationsmodells genutzt werden. Indem ein Austausch vergleichbarer Simulationsergebnisse mit anderen Verzinkereien initiiert wird, wird mit der Einführung der Simulation auch der Grundstein für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess gelegt. So können beispielsweise validierte Strategien bezüglich des Personaleinsatzes und der Auftragsreihenfolgeplanung unternehmensübergreifend übertragen werden. Das vorgestellte Prinzip der Nutzung der Simulation als Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung, der Verzahnung mit der KLR sowie der hiermit einhergehenden Integration in eine Unternehmens-IT-Infrastruktur ließe sich auch auf andere Unternehmen übertragen. Hierfür sind jedoch aufgrund anderer

Strukturen im Produktionsablauf und anderer IT-Infrastrukturen das Simulationsmodell auszutauschen und die Schnittstellen der Simulation zur IT-Umgebung anzupassen.

Danksagung

Die Bearbeitung des Beitragsthemas unter dem Gesichtspunkt der Unternehmensentwicklung findet im Rahmen einer Forschungsk Kooperation zwischen der Universität Kassel und der Seppeler Gruppe statt. Die Finanzierung erfolgt durch die unternehmenseigene Familienstiftung der Dr. Klaus Seppeler Stiftung und dem Zuspruch der Geschäftsführung. Im Namen aller Projektbeteiligten möchten wir uns an dieser Stelle für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Literatur

- Brandau, A.; Tolujew, J.; Weigert, D.: Anwendungen von Simulation zur Verbesserung von Prozessabläufen in Industrieräschereien. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 289-298.
- Corsten, H.: *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. 11. Aufl., München, Wien: R. Oldenbourg 2007.
- Dyckhoff, H.; Spengler, T.S.: *Produktionswirtschaft*. 3. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer 2010.
- Ewert, R.; Wagenhofer, A.: *Interne Unternehmensrechnung*. 8. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer 2014.
- Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik*. 12. Aufl., Norderstedt: Books on Demand 2016.
- Huckshold, M.; Peißker, P.: *Handbuch Feuerverzinken*. 4. Aufl., Weinheim: Wiley-VCH 2016.
- Industrieverband Feuerverzinken: *Industrieverband Feuerverzinken / Institut Feuerverzinken GmbH: Zahlen und Fakten zum Stückverzinken*. Verbandsinterne Daten. <http://www.feuverzinken.com/industrie/zahlen-und-fakten/>. Letzter Zugriff am 26.04.2017.
- Kotler, P.; Bliemel, F.: *Marketing – Management: Analyse, Planung und Verwirklichung*. 10. Aufl., Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2001.
- Kuhn, A.; Rabe, M. (1998): *Simulation in Produktion und Logistik: Fallbeispielsammlung*. Berlin, Heidelberg: Springer 1998.
- Labitzke, N.: *Wertorientierte Simulation zur taktischen Planung logistischer Prozesse der Stahlherstellung*. Dissertation Technische Universität Braunschweig, Wiesbaden: Gabler 2011.
- SDZ GmbH: *Produktwebseite DOSIMIS-3*. <https://www.sdz.de/produkte/dosimis-3/>, Letzter Zugriff am 28.04.2017.
- VDI 3633 Blatt 7: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Kostensimulation*. Berlin: Beuth 2001.
- VDI 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Grundlagen*. Berlin: Beuth 2014.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

Simulationsstudie zur sequentiellen Behälterversorgung in der automatischen Intralogistik

Simulation Study on a Sequential Supply of Small Load Carriers in Automated Intralogistics

Robert Forstner, Stephan Stauber, SimPlan AG, Regensburg (Germany),
robert.forstner@simplan.de, stephan.stauber@simplan.de

Frank Herrmann, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg,
Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung (IPF),
Regensburg (Germany), frank.herrmann@oth-regensburg.de

Abstract: After explaining the necessity of sequential sorting processes within branched conveyor systems and introducing basic sequential controlling principles, this paper analyses with a simulation study different ways of implementing sequential supply processes for small load carriers in an abstracted automated intralogistics system. Simulation results show that a layout with sequencing systems with explicit buffer places can ensure much higher sequential throughput performances than a layout with a loop for sequencing or a layout which implements sequencing processes just with the control of carrier sources. Because of sequential control dependencies in the layout with buffer places, further experiments for sequential supply processes with different layouts forms have to be assessed.

1 Einleitung

Mit dem Anstieg des Internethandels (als Folge der Digitalisierung der Gesellschaft) nahmen auch die logistischen Anforderungen der Unternehmen zu, die für eine Optimierung der Flexibilität und Wirtschaftlichkeit ihrer Logistiklösungen zunehmend sämtliche Bereiche ihrer Intralogistik automatisieren (Barck 2016). Demzufolge werden in Distributionszentren vermehrt automatische Lagerlösungen und Förder-technikanlagen eingesetzt, um die optimale Abwicklung von Kundenaufträgen zu gewährleisten. Ein Anwendungsszenario wäre dazu eine vollautomatische Versorgung mehrerer Kommissionierstationen mit Entnahmebehältern aus einem automatischen Kleinteilelager (AKL).

Die Automatisierung solcher Versorgungsprozesse beinhaltet dabei auch die rechnerunterstützte Verwaltung der Arbeitsschritte in den Zielbereichen. Deshalb benötigen bestimmte Funktionsbereiche (wie etwa die Kommissionierung) eine festgelegte

Reihenfolge an ankommenden Fördergütern (FGs), um die standardisierten Abläufe durchführen zu können.

2 Grundproblematik der sequenziellen Versorgung

Eine sequenzielle Versorgung eines Zielortes stellt bei einem Materialfluss ohne zusammenführenden Knoten keine Herausforderung dar, da die FGs in der richtigen Reihenfolge in einer Quelle gestartet werden können und bei einer linearen Verbindung keine Möglichkeiten zur Veränderung bzw. Verwirbelung einer FG-Sequenz bestehen. Werden die Zielbereiche jedoch nicht nur aus einer, sondern aus mehreren (Teil-)Quellen parallel versorgt, so ergeben sich zusammenführende Materialflussknoten, an denen sich einzelne FGs falsch in eine vorgegebene Sequenz einreihen und damit Sequenz-Verwirbelungen verursachen können.

In Abbildung 1 ist dazu anhand eines prinzipiellen Beispiels verdeutlicht, dass sowohl die Einplanung von FGs auf die Quellen (bzw. die Auswahl einer Quelle für eine Auslagerung eines FGs) als auch die Entfernungen der Quellen zu zusammenführenden Materialflussknoten Einfluss auf die Entstehung von Verwirbelungen haben können. Für die Quellen wird dabei vorausgesetzt, dass diese nur ein FG gleichzeitig starten können (diese Bedingung wird auch für alle weiteren Quellen in dieser Ausarbeitung festgelegt). Zudem unterliegen die Quellen in Abbildung 1 – mit Ausnahme der sequenziellen Reihenfolge innerhalb einer Quelle – keinerlei Restriktionen, d. h. die zugeordneten FGs werden so schnell wie möglich gestartet. So lässt sich in dem Beispiel ausgehend von einer einfachen alternierenden Einplanung der vier FGs erkennen, dass aufgrund von unterschiedlichen Förderdistanzen eine Verwirbelung in der FG-Sequenz entsteht.

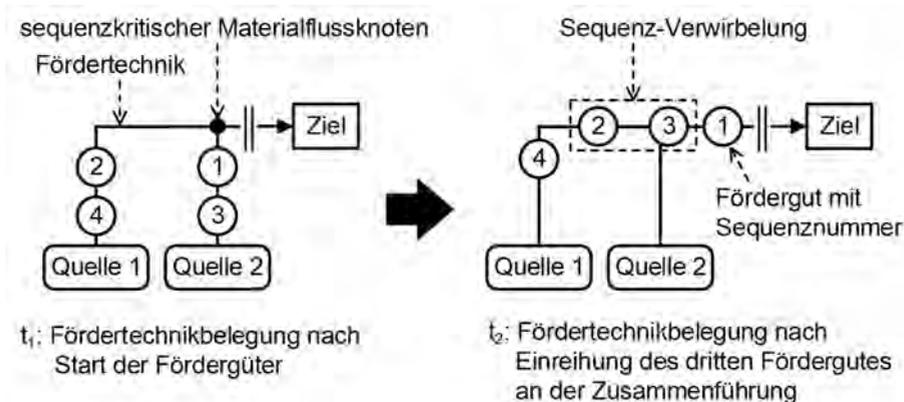


Abbildung 1: Entstehung einer Sequenz-Verwirbelung an einem Materialflussknoten

Ein Anhalten eines FGs direkt vor einem sequenzkritischen Knoten wäre bei größeren Fördertechniklayouts jedoch hinderlich, da mehrere Quellen über solche Knoten verschiedene Ziele mit unterschiedlichen Sequenzrestriktionen versorgen können. Eine Blockierung dieser sequenzkritischen Knoten würde somit Rückstaus verursachen und könnte damit die Quellen in ihrer Durchsatzleistung behindern.

Um trotz der Möglichkeit von Verwirbelungen einen reibungslosen Betrieb von sequenzabhängigen Bereichen zu garantieren, werden in der automatisierten Intralogistik, insbesondere im hochdynamischen Anwendungsbereich der Behälterfördertechnik, spezielle Fördertechnikanlagen eingesetzt, um eventuell verwirbelte FG-Abfolgen im Transit zum Zielbereich wieder in die vorgesehene Reihenfolge zu sortieren. Diese Anlagen werden dabei als Sequenzierungssysteme, die dabei vorkommenden Sortiervorgänge als Sequenzierung bezeichnet.

3 Wissenschaftliche Abgrenzung

Obwohl der Prozess der Sequenzierung in der Praxis häufig Gegenstand von Simulationsuntersuchungen ist, wird die sequenzielle Sortierung in der Literatur nicht ausreichend berücksichtigt. So ist der Begriff des Sortierens in der Intralogistik laut Jodin und ten Hompel (2012, S. 5 f.) vor allem mit der Verteilung von zu sortierenden Gegenständen aus einer ungeordneten Gesamtmenge auf eindeutige Ziele assoziiert. Auch Arnold und Furmans (2009, S. 225) definieren den Begriff als eine Aufteilung einer Menge von Objekten in mehrere Teilmengen. Diese nicht eindeutige Begriffsdefinition verdeutlicht auch die aktuelle VDI 3619 (2015) mit dem Titel „Sortier- und Verteilsysteme für Stückgut“, die die Richtlinie 3312 mit dem weniger präzisen Titel „Sortieren im logistischen Prozess“ ablöste und dabei ebenfalls nur die oben dargelegten Sortiersysteme beschreibt.

Koether (2007, S. 106 ff.) erläutert zwar, dass eine Sortierung von FGs auch die Änderung der Reihenfolge von FGs umfasst, der Fokus seines Kapitels zur Sortierung liegt jedoch wiederum auf der Verteilung von FGs auf verschiedene Zielstellen. Auch ten Hompel et al. (2007, S. 120) nennen in nur einem Satz zu Funktionen von Förderanlagen, dass das „Sortieren [...] das Ordnen einer Anzahl von Gütern in eine vorgegebene Sequenz [beschreibt]“. Analog zu dieser kurzen Übersicht betonen auch Arnold und Furmans (2009, S. 231 f.), dass Literaturquellen zu logistischen Sortiersystemen nur sehr eingeschränkt vorhanden sind. Deshalb soll diese Ausarbeitung einen Beitrag zur wissenschaftlichen Erfassung von Sequenzierungsprozessen in der automatisierten Intralogistik liefern.

4 Grundlegende Steuerung von Sequenzierungsprozessen

Der Steuerungsablauf sämtlicher Sequenzierungsprozesse folgt immer einem grundlegenden Muster: Zunächst wird eine Sequenzliste mit Einträgen zu FGs erstellt, die einen zugehörigen Sequenzpunkt in einer vorgegebenen Reihenfolge passieren sollen. Als Sequenzpunkt wird dabei beispielsweise ein sequenzkritischer Materialflussknoten definiert. Zudem wird für einen Sequenzpunkt auch mindestens ein Prüfpunkt festgelegt, an dem anhand der Sequenzliste zu ermitteln ist, ob ein FG in den Sequenzpunkt direkt eintreten darf oder alternativ gesteuert werden muss. Bei einer strikten Sequenzierung ist es dabei beispielsweise nur dem FG des ersten Eintrages einer Sequenzliste erlaubt, den Sequenzpunkt als nächstes zu durchqueren. Hat ein FG – nach erfolgreicher Einfahrtsprüfung – den eigentlichen Sequenzpunkt auf der Fördertechnik erreicht, so wird es aus der Sequenzliste ausgebucht. Dadurch kann wiederum einem sequenziellen Nachfolger an einem Prüfpunkt erlaubt werden, als nächstes in den Sequenzpunkt einzufahren.

Der entscheidende Teil für den Ablauf von Sequenzierungsprozessen ist dabei die Definition der alternativen Steuerung an einem Prüfpunkt, falls ein FG nicht direkt zum Sequenzpunkt gefördert werden darf. Hier muss sichergestellt werden, dass alle sequenziellen Vorgänger den Sequenzpunkt vor einem zunächst abgewiesenen FG passieren können. Um die Anzahl an (notwendigen) alternativen Steuerungen in einem lokalen Fördertechnikbereich zu reduzieren, lässt sich die Einfahrtsprüfung für einen Sequenzpunkt mit der Verwendung einer sogenannten *Range* auch weniger restriktiv gestalten. Dieser Wert gibt an, welche numerische Sequenzposition ein FG – relativ in einer Sequenzliste – maximal haben darf, um in einen Sequenzpunkt (von einem Prüfpunkt aus) eintreten zu dürfen. Eine strikte Sequenzierung würde dabei eine Range von 1 bedeuten. Erhöht man jedoch die Range, so können auch nach dem Sequenzpunkt (begrenzte) Sequenzverwirbelungen auftreten, da auch FGs mit höherer numerischer Sequenzposition einfahren dürfen oder – bei mehreren Prüfpunkten für einen Sequenzpunkt – auch mehrere FGs gleichzeitig zu einem Sequenzpunkt unterwegs sein können.

Anhand der Range kann eine Sequenzierung auch aufgeteilt werden, indem in einem Fördertechnikbereich eine *Vorsequenzierung* mit höherer Range durchgeführt wird, um diesen Bereich aufgrund weniger alternativer Steuerungen geringer zu belasten. Dies erfordert jedoch eine abschließende Sequenzierung in einem nachgeschalteten Fördertechnikbereich, um den finalen Ordnungsgrad für ein Ziel herzustellen. Somit gilt es abzuwägen, an welchen Stellen in einem Layout Sequenzpunkte definiert und mit welcher Range diese Punkte gesteuert werden sollten, um eine leistungsstarke Versorgung der Zielbereiche trotz sequenzieller Restriktionen zu gewährleisten.

5 Simulationsstudie zur sequenziellen Behälterversorgung

In der nachfolgend vorgestellten Simulationsstudie werden schrittweise mehrere Groblayouts einer abstrahierten Intralogistikanlage untersucht, in der vier Behälterquellen („Src_1“ bis „Src_4“) zwei Kommissionierstationen („KOMM_1“ und „KOMM_2“) mit Kleinladungsträgern (strikt) sequenziell versorgen sollen. Die verschiedenen Layouts repräsentieren dabei verbreitete Ansätze, die in dieser Studie unter gleichen Rahmenbedingungen auf ihre Leistungsfähigkeit hin miteinander verglichen werden. Untersucht wurden die Layout-Varianten mit Hilfe von *Tecnomatix Plant Simulation 12.0* der *Siemens AG* und einer erweiterten Version des Bausteinkastens *SimSuite* der *SimPlan AG*. Zudem ist zu dieser Studie zu betonen, dass die Planungsüberlegungen an eine reale Anlage angelehnt sind. Die Simulationsreihen wurden jedoch mit angepassten Leistungsdaten und abstrahierten Layouts erstellt, um einen verallgemeinernden Charakter der Studie zu erreichen.

5.1 Ausgangssituation

Die Aufgabenstellung dieser Studie besteht darin, dass vier Quellen mit einer maximalen Durchsatzleistung von je 270 Behältern pro Stunde zwei Ziele mit einer maximalen Leistung von je 450 Behältern pro Stunde versorgen sollen. Da die maximale Durchsatzleistung der Quellen in Summe höher als die geforderte Leistung der Ziele ist, wird eine kontinuierliche Auslastung der Ziele von 100 % angestrebt. Die Leistung der Quellen bezieht sich dabei nur auf die reine Auslagerungsleistung:

modelliert eine Quelle eine Gasse mit Regalbediengerät (mit einem Lastaufnahmemittel) in einem AKL, so ist die maximale Durchsatzleistung als eine Anzahl an Doppelspielen pro Stunde zu interpretieren. Die in der Simulation genutzten Behälter haben eine einheitliche Abmessung von 0,6 m x 0,4 m und werden ausschließlich von Einzelförderern und Kreuzungselementen transportiert. Die Förderlänge der Einzelförderer beträgt dabei in Längsrichtung 0,72 m (Behälterlänge von 0,6 m) und in Querrichtung 0,54 m (Behälterlänge von 0,4 m). Kreuzungen und Eckumsetzer sind für eine maximale Eckumsetzleistung von 1.200 Behältern pro Stunde parametrisiert. Die einheitliche Fördergeschwindigkeit beträgt 0,6 m/s. Diese Leistungsdaten entsprechen üblichen Werten von Behälterfördertechnikanlagen, deren Simulation und Optimierung von der *SimPlan AG* betreut wurden.

Jedes Ziel fordert vom Quellbereich kontinuierlich und sequenziell Behälter an, um die eigene maximale Durchsatzleistung zu erreichen. Die Einplanung der angeforderten Behälter auf einzelne Quellen erfolgt gleichverteilt und berücksichtigt dabei keine Auslastung der Quellen. Dies setzt voraus, dass die beauftragten Artikel – in entsprechenden Behältern – zu jedem Zeitpunkt in jeder Quelle vorhanden sind. Aufgrund dieser Einplanungsstrategie und der dargestellten Fördertechnik-Effekte können jedoch Verwirbelungen entstehen, die anhand verschiedener Fördertechnik-Varianten und Sequenzierungsprozesse zu korrigieren sind. Zur Bewertung einer Layout-Variante sind vor allem die Auslastungsgrade der Zielstationen zu untersuchen, denn basierend auf den genannten Leistungsparametern stellen Quellen und Fördertechnik keinen Engpass dar. Demzufolge sind Leistungsabrisse an den Zielen auf Sequenzierungsprozesse zurückzuführen.

In einer Voruntersuchung des Grundlayouts wurden die Auslastungswerte der Ziele über 12 Stunden analysiert. Dabei hat sich ab der zweiten Stunde eine maximale Abweichung von 4 % der stündlichen Auslastungen vom Mittelwert dieser Auslastungswerte ergeben, woraus sich eine statistische Signifikanz ableiten lässt. Zur Erhöhung dieser Signifikanz beträgt der Untersuchungshorizont jedes Simulationslaufes 26 Stunden (mit einer zweistündigen Einschwingphase, die statistisch unberücksichtigt bleibt). Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Kennzahlen der durchsatzkritischen Bausteine gesondert überprüft. Dazu gehören die Taktzeiten mit korrelierenden maximalen Durchsätzen von Quellen und Senken. Zudem wurden die maximalen Eckumsetzleistungen der Kreuzungselemente validiert. Neben diesen rein technischen Überprüfungen wurde auf logischer Ebene an jedem Ziel die korrekte sequenzielle Ankunft der FGs überprüft und eventuelle Abweichungen mitprotokolliert. Zudem wurde die Trigger-Logik der sequenziellen Steuerungen validiert, indem die Zeitpunkte der Ausbuchungen an einem Sequenzpunkt mit den Zeitpunkten, an denen die sequenziellen Vorgänger (der ausgebuchten FGs) den jeweiligen Prüfpunkt durchquerten, verglichen wurden.

5.2 Layout 1 ohne Sequenzierungssystem

Als erstes Layout wird nachfolgend ein Fördertechniksystem untersucht, das kein explizites Sequenzierungssystem enthält.

5.2.1 Layout und Steuerung des Systems

Da in dem ersten Layout, wie in Abbildung 2 dargestellt, nach dem letzten sequenzkritischen Materialflussknoten der Quellenvorzone keine Möglichkeit mehr besteht,

eventuell auftretende Verwirbelungen im Transit bis zu den Zielen zu korrigieren, muss durch die Freigabe der FGs in den Quellen sichergestellt werden, dass die FGs diesen Knoten strikt sequenziell passieren. Dazu wurde an dem letzten sequenzkritischen Materialflussknoten für jedes Ziel ein Sequenzpunkt mit zugehöriger Sequenzliste definiert, anhand derer die FG-Starts in den Quellen gesteuert werden. So wird ein angefordertes FG, nachdem es zufällig auf eine der Quellen eingeplant wurde, solange in der Quelle zurückgehalten, bis der (strikt) sequenzielle Vorgänger (desselben Ziels) den Sequenzpunkt am Ende der Vorzone passiert hat.

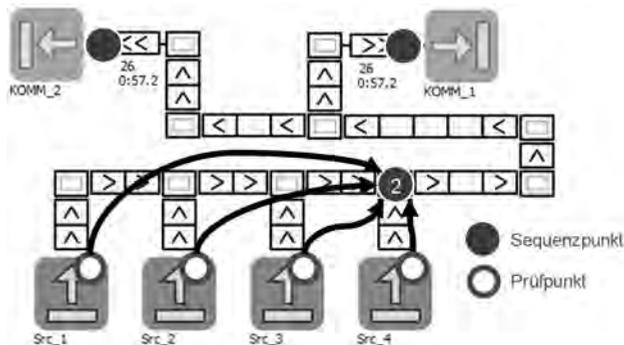


Abbildung 2: Layout ohne Sequenzierungssystem

5.2.2 Simulationsergebnisse und Fazit zu Layout 1

Die Simulation zur Untersuchung des ersten Layouts hat ergeben, dass die Ziele „KOMM_1“ und „KOMM_2“ nur die durchschnittlichen Auslastungsgrade von 36,4 % und 36,3 % (als Mittelwerte der durchschnittlichen Auslastungen pro Stunde) erreichten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Quellen aufgrund der sequenziellen Freigabesteuerung durchschnittlich nur 81,8 Behälter pro Stunde auslagerten. Die Quellen wurden demnach aufgrund der strikt sequenziellen Auslagerungssteuerung wechselseitig blockiert.

5.3 Layout 2 mit Fördertechnik-Loop

Zur Optimierung des Gesamtsystems im Sinne einer verbesserten Versorgung der Ziele muss somit im Vergleich zum ersten Layout eine sequenziell weniger restriktive Steuerung der Quellen umgesetzt werden. Dies setzt jedoch eine nachgeschaltete Sequenzierung voraus, sodass in diesem Kapitel ein Groblayout mit einem Fördertechnik-Loop zur Sequenzierung untersucht wird.

5.3.1 Layout und Steuerung des Systems

Um die Durchsätze der Quellen im Vergleich zum ersten Layout zu erhöhen, sollen mehr parallele Auslagerungen in den Quellen erlaubt werden, die wiederum entsprechende Sequenzverwirbelungen verursachen können. Um trotzdem eine strikt sequenzielle Versorgung der Zielbereiche sicherzustellen, wurde die Quellenvorzone zu einem Fördertechnik-Kreislauf geschlossen (Abb. 3). An den Loop-Ausschleusungen wurden dabei Sequenzpunkte definiert, anhand derer für ein ankommendes FG geprüft werden kann, ob dieses FG zum Ziel ausgeschleust werden

darf oder weiterhin im Loop kreisen muss. (Der Prüfpunkt fällt an diesen Ausschleusungen direkt mit dem Sequenzpunkt zusammen). Da alle verwirbelten FGs somit vorerst weiter im Loop kreisen müssen, hängt der Loop-Füllgrad direkt von der sequenziellen Steuerung der Quellen bzw. von der dabei zugelassenen Verwirbelung ab. Die Freigabesteuerung der Quellen ist wiederum mit Prüfpunkten an den Quellen umgesetzt. Dabei wird jedoch eine Einfahrt in den – je FG-Ziel – zugehörigen Sequenzpunkt an einem Loop-Output geprüft.

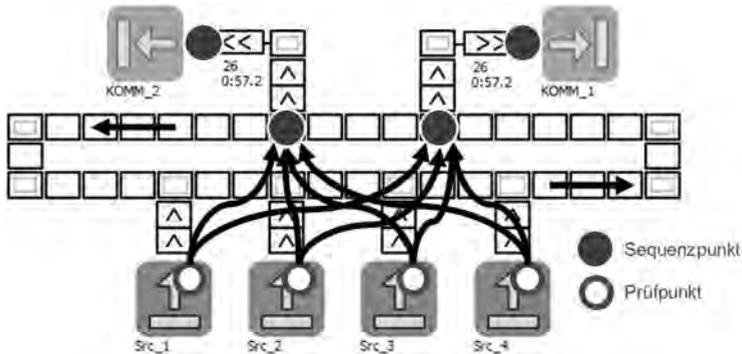


Abbildung 3: Layout mit Fördertechnik-Loop

5.3.2 Simulationsergebnisse und Fazit zu Layout 2

Zur Untersuchung von parallelen FG-Starts und damit entstehenden Verwirbelungen wurden für die sequenzielle Freigabesteuerung der Quellen Range-Werte von 1 bis 15 simuliert. Wie in Tabelle 1 aufgelistet, erhöhen sich mit einer ansteigenden Range der Quellensteuerung zunächst auch die durchschnittlichen Auslastungen der beiden Ziele. Dies lässt sich mit dem höheren durchschnittlichen Durchsatz der Quellen erklären, der wiederum durch die größere Freigabe-Range und der damit weniger restriktiven Quellen-Freigabe ermöglicht wird.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse zum zweiten Layout

Freigabe-Range (/Experiment)	Auslastung „KOMM_1“	Auslastung „KOMM_2“	Füllstand Loop	Durchsatz Quellen
1	20,6 %	18,5 %	1,2	44,0
3	35,5 %	33,1 %	4,6	77,1
5	33,9 %	32,9 %	8,6	75,1
7	33,4 %	32,0 %	12,7	73,6
9	29,2 %	29,4 %	16,8	66,0
11	23,3 %	22,9 %	21,0	52,1
13	19,3 %	18,6 %	25,2	42,6
15	11,4 %	11,7 %	29,5	26,0

Nach dem Anstieg verbleiben die Auslastungswerte der Zielbereiche auch bei ansteigenden Range-Werten auf einem konstanten Niveau (Range 3 bis 7). Das Fördertechniksystem befindet sich dabei in einem relativ stabilen Zustand, d. h., es werden Verwirbelungen erfolgreich sequenziert (wenn auch auf sehr geringem Niveau), ohne dass der Füllstand des Loops die Sequenzierungsleistung einschränkt.

Mit der Erhöhung der Freigabe-Range nimmt jedoch – aufgrund des ansteigenden Verwirbelungsgrades – auch der durchschnittliche Loop-Füllstand zu. Ab dem 9. Experiment ist dabei zu erkennen, dass dieser erhöhte Füllgrad den Materialfluss durch den Kreislauf zunehmend einschränkt. Abbildung 4 verdeutlicht dazu anhand von Loop-Durchlaufzeiten, dass der ansteigende Loop-Füllgrad in direkten Zusammenhang mit Mehrfachkreisern steht.

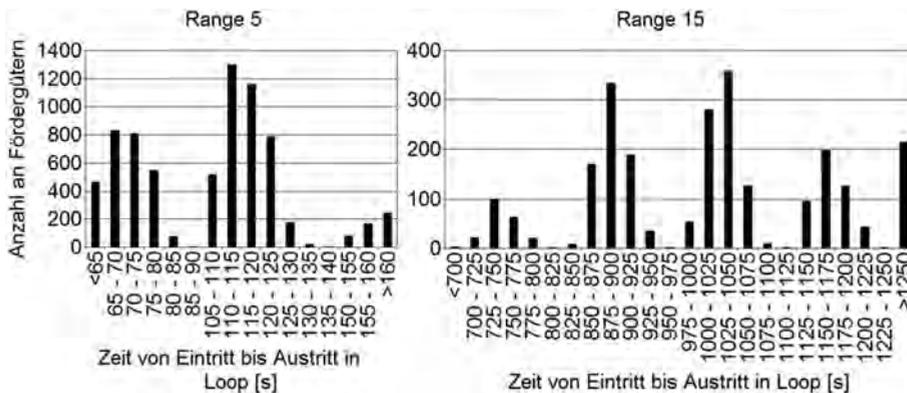


Abbildung 4: Durchlaufzeiten von Fördergütern in Layout 2 mit Range 5 und 15

Aufgrund dieser Ergebnisse ist zu folgern, dass mit einer höheren Freigaberange die Durchsatzleistung der Quellen teilweise erhöht werden konnte, der stetig ansteigende Loop-Füllgrad jedoch einer durchsatzstarken Versorgung der Ziele zunehmend im Weg stand. Der Loop konnte somit nicht die benötigte Sequenzierungsleistung erbringen, um die geforderte Auslastung der Ziele (nahe 100 %) zu erreichen. Aufgrund der positiven Ansätze bei Experimentläufen mit geringen Range-Werten kann ein Loop jedoch für eine Vorsequenzierung eingesetzt werden, wenn mit einer begrenzt zugelassenen Verwirbelung an den Output-Sequenzpunkten die Anzahl an Mehrfachkreisern reduziert und damit die Problematik eines zu hohen Füllgrades vermieden wird.

5.4 Layout 3 mit Sequenzierungssystemen mit Sequenzplätzen

Nachdem die ersten beiden Layouts dieser Studie die Zielbereiche nicht zufriedenstellend sequenziell versorgen konnten, wird nachfolgend ein Layout mit einem weiteren Typ von Sequenzierungssystemen vorgestellt.

5.4.1 Layout und Steuerung des Systems

Wie in Abbildung 5 dargestellt ist, wurde im dritten Layout die Quellenvorzone ebenso wie die Definition der Quellensteuerung analog zum ersten Layout gestaltet.

Die Freigabe-Range der Quellen wird jedoch mit höheren Werten im Vergleich zum ersten Layout gesteuert, um die Durchsätze der Quellen durch parallele FG-Starts zu erhöhen. Die dadurch entstehenden Verwirbelungen werden schließlich von zwei Sequenzierungssystemen („Seq_Buf_1“ und „Seq_Buf_2“) korrigiert. Zur Sequenzierung verwenden diese Systeme dabei seitlich vom Hauptstrom angeordnete Pufferplätze (bzw. Sequenzplätze), die mit verwirbelten FG belegt werden, um sequenziell notwendige Überholvorgänge zu ermöglichen. So kann etwa ein Sequenzierungssystem mit acht Sequenzplätzen auch acht verwirbelte FGs puffern und damit eine Verwirbelung bis zu einer Range von 9 korrigieren. Das Puffern eines FGs auf einem Sequenzplatz wird dabei anhand des Sequenzpunktes am letzten sequenzkritischen Materialflussknoten *innerhalb* dieser Systeme gesteuert; der zugehörige Prüfpunkt befindet sich am Eingang der Systeme.

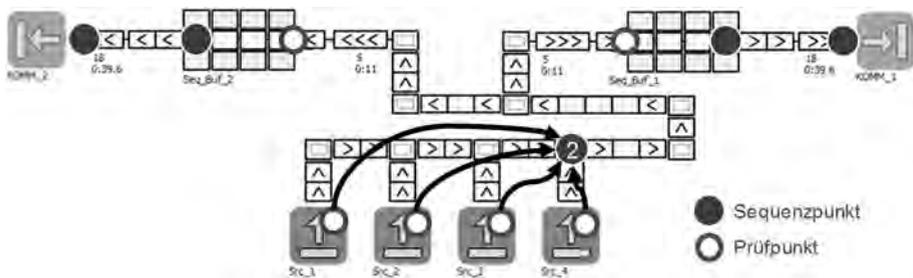


Abbildung 5: Layout mit Sequenzierungssystemen mit Sequenzplätzen

5.4.2 Simulationsergebnisse und Fazit zu Layout 3

Für die Untersuchung dieses Layouts wurden Simulationsläufe für vier, sechs und acht Sequenzplätze je Sequenzierungssystem durchgeführt (die Konfiguration mit acht Sequenzplätzen ist dabei in Abbildung 5 verdeutlicht). Mit der Erhöhung der Sequenzplätze konnte auch die Freigabe-Range der Quellen angepasst werden, um mehr parallele Auslagerungen und damit höhere Quell-Durchsätze zu ermöglichen. Die Ergebnisse der drei Simulationsläufe sind dazu in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse zum dritten Layout

Anzahl Sequenzplätze	Range (Quellen)	Auslastung „KOMM_1“	Auslastung „KOMM_2“	Durchsatz Quellen
4	5	90,7 %	91,7 %	205,2
6	7	97,4 %	98,2 %	220,2
8	9	99,5 %	99,9 %	224,7

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass Sequenzierungssysteme mit Sequenzplätzen im Vergleich zu Loops oder einer ausschließlichen Quellensteuerung eine viel höhere Sequenzierungsleistung erbringen können und damit primär für Sequenzierungen zu empfehlen sind. Als Nachteil muss jedoch die direkte Abhängigkeit der Freigabe-Range der Quellen von nachgeschalteten Sequenzplätzen genannt

werden. Sind etwa im Zuge einer Systemerweiterung zusätzliche Quellen oder auch zusätzliche Ziele einer Intralogistikanlage hinzuzufügen, so kann es notwendig sein, die Freigabe-Ränge der Quellen zu erhöhen, um auch die (Gesamt-)Inputleistung entsprechend zu steigern. Dadurch würden je Ziel mehr Sequenzplätze benötigt, was wiederum zu höheren Folgekosten führen kann.

6 Fazit und Ausblick

Neben grundlegenden Einführungen in die intralogistische Sequenzierung hat dieser Beitrag verbreitete Lösungskonzepte anhand abstrahierter Layouts in einer Simulationsstudie vorgestellt und ihre Leistungsfähigkeit unter Verwendung von Simulationsergebnissen miteinander verglichen. So wurde für ein abstrahiertes und verallgemeinertes Anlagenbeispiel nachgewiesen, dass eine sequenzielle Behälterversorgung ausschließlich durch eine sequenzielle Freigabesteuerung der Quellen oder durch das Einplanen eines Loops als Sequenzierungssystem zu deutlichen Leistungseinbußen an den zu versorgenden Zielbereichen führt. Das untersuchte Layout mit Sequenzierungssystemen mit Sequenzplätzen konnte schließlich hohe Auslastungsgrade der Ziele (nahe 100 %) erreichen. Aufgrund der direkten Abhängigkeit des zulässigen Verwirbelungsgrades von der Anzahl an nachgeschalteten Sequenzplätzen muss jedoch gefolgert werden, dass zur Abschwächung dieser Abhängigkeit zwischen Quellen und Sequenzierungssystemen mit Sequenzplätzen ein zusätzlicher Fördertechnikbereich mit der Möglichkeit zur Vorsequenzierung integriert werden sollte. Zur weiteren Erfassung der sequenziellen Versorgung soll dazu ein zusätzliches Groblayout mit einer Kombination aus einem Fördertechnik-Loop und je Ziel ein Sequenzierungssystem mit Sequenzplätzen untersucht werden. Der Loop würde dabei (begrenzte) Vorsequenzierungen ermöglichen und die genannte Erweiterung einer Anlage um weitere Quellen und Ziele erleichtern. Zu dieser Kombinationslösung sollen Steuerungsmöglichkeiten und die resultierende Sequenzierungsleistung analysiert werden. Ferner soll herausgearbeitet werden, wie stark sich die Steuerungsmöglichkeiten von Sequenzierungssystemen mit Sequenzplätzen durch zusätzliche Sequenzpunkte innerhalb dieser Systeme verbessern lassen.

Literatur

- Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- Barck, R.: Flexible Automation. Logistik heute (2016) 1-2, S. 60-61.
- Jodin, D.; ten Hompel, M.: Sortier- und Verteilsysteme – Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Koether, R.: Technische Logistik. 3. Aufl. München: Carl Hanser 2007.
- ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2007.
- VDI 3619: Sortier- und Verteilsysteme für Stückgut. Berlin: Beuth 2015.

Author Index

Abel, Dennis.....	219
Ait Alla, Abderrahim.....	269
Akbulut, Akin.....	189
Altendorfer, Klaus.....	139
Ammouriova, Majsja.....	109
Angelidis, Evangelos.....	89
Aurich, Paul.....	239
Bauer, Kai Philipp.....	365
Baumann, Frank.....	59
Bergmann, Sören.....	169
Bockel, Björn.....	355
Bohn, Daniel.....	89
Bös, Mathias.....	469
Bracht, Uwe.....	29
Buswell, Andreas.....	19
Claus, Thorsten.....	315
Czenskowsky, Torsten.....	423
Dangelmaier, Wilhelm.....	189
Decker, André.....	79
Dross, Felix.....	109
Dunkelberg, Heiko.....	39
Elbert, Ralf.....	159, 259
Etxagibel Larrañaga, Asier.....	229
Felberbauer, Thomas.....	139
Feldkamp, Niclas.....	169
Felsch, Thomas.....	423
Flores García, Erik.....	229

Author Index

Forstner, Robert.....	489
Franke, Hubertus	423
Franke, Matthias	59
Freitag, Michael.....	79, 269
Fritzsche, Philipp.....	219
Genßler, Paul Richard	99
Gereke, Torsten	393
Gißrau, Mike	393
Glaser, Rolf	479
Gopalakrishnan, Maheshwaran.....	403
Gromnitza, Ulrike.....	59
Groß, Guido.....	9
Gruler, Aljoscha	129
Gutenschwager, Kai	179
Gyulai, Dávid	413
Haase, Veronika	365
Heger, Jens	287
Heidrich, Tobias	39
Henninger, Matthias	19
Herrmann, Frank.....	315, 489
Hesselbach, Jens	39
Hrdina, Jan.....	325
Illgen, Benjamin	373
Ipsen, Carola.....	109
Jawale, Mandar.....	295
Jessen, Ulrich.....	479
Jósvai, János	305, 459
Juan, Angel A.	129
Klußmann, Jens	335
Klüter, Astrid.....	119, 129

Knigge, Jan-Karl.....	159
Koch, Stefan	287
Kühn, Markus	345
Kühn, Mathias	99
Kuhrke, Benjamin.....	249
Kuschicke, Felix.....	249
Lang, Sebastian.....	199
Laroque, Christoph	189, 403
Lewandowski, Marco	269
Linder, Andreas	365
Luckert, Melanie.....	383
Lütjen, Michael.....	79
Martini, Andreas.....	279
Mauksch, Tobias.....	279
Mayer, Gottfried.....	1, 443
Mayer, Thomas.....	149
Meschede, Henning	69
Meyer, Jan-Dirk.....	335
Mieschner, Marielouise	1, 443
Monek, Gergő.....	305
Monostori, László.....	413
Müller, Bastian	345
Müller, Christiane.....	383
Müller, Jan Philipp	259
Noche, Bernd.....	295
Oelker, Stephan	269
Peesel, Ron-Hendrik.....	69
Peirleitner, Andreas Josef.....	139
Peter, Tim	9
Pfeiffer, András	413

Author Index

Pitsch, Holger	9
Pohlig, Denise.....	365
Prell, Bastian	49
Prote, Jan-Philipp	383
Putz, Matthias	49
Rabe, Markus.....	9, 109, 119, 129
Redecker, Marc Allan.....	79
Reggelin, Tobias.....	199, 239
Richter, Michael	479
Rippel, Daniel.....	79
Rose, Oliver	89, 149
Rudel, Steffi.....	433
Rudolph, Torsten	219
Scharf, Katrin	259
Schauf, Christian	199
Schaumburg, Chris	69
Scheffermann, Robert.....	249
Schele, Moritz.....	345
Schlegel, Andreas	9, 49
Schlosser, Florian	69
Schlüter, Wolfgang.....	19
Schmidt, Jörg.....	19
Schmidt, Peter-Michael	179
Schmidt, Thorsten.....	99
Schmitt, Dominik	109
Schuh, Günther	383
Schulze, Thomas.....	169
Seewaldt, Marco	9, 29
Seidel, Stephan	59
Seliger, Günther.....	345

Sender, Jan.....	373
Skoogh, Anders	403
Spang, Konrad	355
Stache, Ulrich	279
Stauber, Stephan	489
Stoldt, Johannes	9, 49
Stolipin, Jana	209
Straßburger, Steffen.....	169
Szántó, Norbert.....	305, 459
Thiel, Inga	451
Thoben, Klaus-Dieter	79
Tietze, Simon.....	119
Uhlig, Tobias	149
Uhlmann, Eckart.....	249
Vielhaber, Michael	451
Vitzthum, Thorsten.....	315
Völker, Sven	179
Voss, Thomas	287
Weigert, David	199, 239
Weiss, Tim.....	39
Wenzel, Sigrid	9, 209, 479
Willeke, Nils.....	249
Wilson, Heike	59
Zhou, Zhugen	89
Zülch, Gert.....	325



ASIM-Mitteilung Nr. AM 164

ISBN 978-3-7376-0192-4

UNI KASSEL
VERSITÄT



9 783737 601924 >