

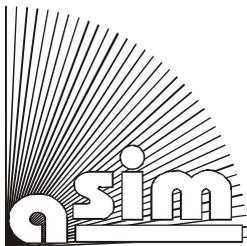
Arbeitsgemeinschaft Simulation in der GI e.V.

## **ASIM 2009**

Umwelt – Klima – Energie – Logistik - Technik

Simulationstechnik/Simulation Techniques  
20. Symposium in Cottbus  
September 2009

herausgegeben von  
Albrecht Gnauck und Bernhard Luther



ASIM-Mitteilung AMB 124

Das 20. Symposium Simulationstechnik wird vom Fachausschuss ASIM (Arbeitsgemeinschaft Simulation) des Fachbereiches „Informatik in den Lebenswissenschaften“ der Gesellschaft für Informatik e. V. veranstaltet. ASIM ist eine Arbeitsgemeinschaft im deutschsprachigen Raum zur Förderung und Weiterentwicklung von Modellbildung und Simulation in Grundlagen und Anwendungen sowie zur Verbesserung der Kommunikation in Theorie und Praxis.

## **Programmkomitee**

Ingrid Bausch-Gall, BAUSCH-GALL GmbH, München  
Ulrich Brannolte, Bauhaus-Universität, Weimar  
Felix Breiteneker, Technische Universität, Wien  
Christina Deatcu, Hochschule Wismar  
Albrecht Gnauck, Brandenburgische Technische Universität, Cottbus  
Joachim Haase, Fraunhofer IIS/EAS, Dresden  
Wilfried Krug, Dualis GmbH, Dresden  
Heinz-Theo Mammen, Hella KGaA Hueck & Co, Lippstadt  
Werner Maurer, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur  
Dietmar P. F. Möller, Universität Hamburg  
Katherina Nöh, Forschungszentrum Jülich  
Klaus Panreck, Hochschule Osnabrück  
Thorsten Pawletta, Hochschule Wismar  
Markus Rabe, Fraunhofer IPK, Berlin  
Thomas Schulze, Technische Universität, Dresden  
Peter Schwarz, Fraunhofer IIS/EAS, Dresden  
Helena Szczerbicka, Universität Hannover  
Sigrid Wenzel, Universität Kassel  
Wolfgang Wiechert, Universität Siegen  
Thomas Wiedemann, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden  
Jochen Wittmann, Universität Hamburg

## **Organisation**

Brandenburgische Technische Universität Cottbus  
Lehrstuhl Ökosysteme und Umweltinformatik

Albrecht Gnauck (Leitung)  
Gabriele Richter (Konferenzsekretariat, Tagungsbüro),  
Bernhard Luther (Publikationen)  
Mirko Filetti (Technik)  
Rolf de Vries (Tagungsbüro)  
Helma de Vries (Tagungsbüro)  
Hans Reusch (Tagungsbüro)  
Friedburg Reusch (Tagungsbüro)  
Ernest Fongwa (Assistent)  
Shafi Noor Islam (Assistent)

**Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr. habil., Dipl.-Math. Albrecht Gnauck, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Ökosysteme und Umweltinformatik, Karl-Wachsmann-Allee 1, 03046 Cottbus, Tel. 0355/692713, Fax 0355/692743, e-mail: [albrecht.gnauck@tu-cottbus.de](mailto:albrecht.gnauck@tu-cottbus.de)

Dr. Bernhard Luther, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Ökosysteme und Umweltinformatik, Konrad-Wachsmann-Allee 1, 03046 Cottbus, Tel. 0355/692742, Fax 0355/692743, [luther@tu-cottbus.de](mailto:luther@tu-cottbus.de)

**Konferenzort**

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Zentrales Hörsaalgebäude, Campus der BTU Cottbus

**Homepage des 20. Symposiums Simulationstechnik**

[www.tu-cottbus.de/asim2009](http://www.tu-cottbus.de/asim2009)

E-mail : [asim2009@tu-cottbus.de](mailto:asim2009@tu-cottbus.de)

## Vorwort

Das Management komplizierter und komplexer Prozesse in der Industrie und der Landwirtschaft, bei der Produktion und Verteilung industrieller Produkte sowie von Nahrungsgütern, im Geschäftsgang von Finanzinstituten und Versicherungen, auf den Gebieten Umwelttechnik und nachhaltiger Ressourcenschutz sowie Verwaltungsorganisation und Dienstleistungen ist ohne den Einsatz moderner Instrumente und Werkzeuge der Informatik nicht mehr möglich. Insbesondere spielen die mathematische Modellierung und Simulation als Methoden zur Lösung und Entscheidung von Problemen eine herausragende Rolle. Entsprechend den vielfältigen technischen Innovationen und den in ihrer Breite und Anzahl stark angewachsenen nicht-technischen Anwendungen ist auch die Simulationstechnik gefordert, mit neuen und optimierten Methoden der raschen Entwicklung in Forschung, Anwendung und Ausbildung Rechnung zu tragen und zu dokumentieren. Diesem Anspruch ist auch das vom Fachausschuss ASIM (Arbeitsgemeinschaft Simulation) des Fachbereiches „Informatik in den Lebenswissenschaften“ der Gesellschaft für Informatik e. V. an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus veranstaltete 20. Symposium Simulationstechnik verpflichtet. Damit wird die erfolgreiche Serie von Konferenzen der ASIM fortgesetzt, die den Austausch zwischen Wissenschaft, Industrie, Anwendern, Verbänden und Verwaltungen auf allen Gebieten der Simulationstechnik fördern und den neuesten Stand in Forschung, Entwicklung und praktischer Umsetzung aufzeigen soll.

Gemäß dieser Zielsetzung der ASIM steht die Förderung und Weiterentwicklung von Modellbildung und Simulation in ihren theoretischen Grundlagen und praktischen Anwendungen sowie die Verbesserung der Kommunikation zwischen Theorie und Praxis, zwischen Naturwissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern im Mittelpunkt des 20. Symposiums Simulationstechnik. Der inhaltliche Bogen wird von theoretischen Grundlagen der Simulationstechnik über Methoden und Werkzeuge zur Modellbildung und Simulation bis hin zu praktischen Anwendungen von Simulationen in der Industrie und Nahrungsmittelproduktion, in Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie in den Bereichen Medizin-, Umwelt- und Energietechnik, Logistik und Verkehrswesen, Klima und nachhaltige Entwicklung gespannt.

Dass das 20. Symposium Simulationstechnik vom Vorstand der ASIM an die 1991 gegründete östlichste deutsche Technische Universität nach Cottbus vergeben wurde, ist zugleich Auszeichnung und Ansporn. Zum Profil der BTU gehören die Hauptforschungsrichtungen Umwelt, Energie, Material, Bauen sowie Information/Kommunikation. Diese korrespondieren direkt mit den thematische Schwerpunkten des Symposiums: Modellbildung und Simulation technischer und nichttechnischer Systeme, Simulation und e-Learning, Simulation und Optimierung, verteilte und web-basierte Simulation, Simulation in der Medizin- und Umwelttechnik, Simulation zur Produktionsplanung und -steuerung, Simulation von Organisationsstrukturen und Geschäftsprozessen, die digitale Fabrik, Modellierung und Simulation in Automotive, Modellierung mechatronischer Systeme, Simulation im Verkehrs- und Transportwesen, Simulation in Bauwesen und Architektur, Modellbildung und Simulation thermischer Systeme, Simulation von Energiesystemen einschließlich erneuerbarer Energien, Simulation land-, forst- und wasserwirtschaftlicher Systeme sowie Simulation von Klimaprozessen.

Die Organisation, die Gestaltung und das Gelingen eines Symposiums Simulationstechnik ist stets nur durch das Engagement vieler einzelner Personen und durch die Unterstützung von Institutionen und Firmen möglich. Mein Dank gilt zuerst allen Referentinnen und Referenten für die sorgfältige Vorbereitung ihrer Beiträge. Den Mitgliedern des Programmkomitees und allen Gutachtern danke ich für kritische Bewertungen der Beiträge und detaillierte Hinweise zur Anfertigung der Kurz- und Langfassungen der Beiträge. Durch ihre Arbeit haben sie wesentlich zur inhaltlichen Qualifikation des Symposiums beigetragen. Danken möchte ich auch den Sitzungsleitern für die Moderation des wissenschaftlichen Programms.

Meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bin ich zu großem Dank verpflichtet. Insbesondere möchte ich Frau Gabriele Richter danken, die das Konferenzsekretariat von Anfang an engagiert und initiativreich betreut hat. Für ihre intensive Mitarbeit und technischen Support sei den Herren Dr. Luther und Dipl.-Ing. Filetti herzlich gedankt. Mein Dank gilt auch Herrn und Frau de Vries sowie Herrn und Frau Reusch für ihre Arbeit im Tagungsbüro.

Dank der Unterstützung durch Vattenfall Europe Mining & Generation AG sind Exkursionen in das Kraftwerk Jänschwalde und in den Tagebau Jänschwalde möglich. Eine dritte Exkursion zeigt weitere naturräumliche Gegebenheiten der Region am Beispiel des Spreewaldes auf. Mein Dank gilt deshalb der Leitung des Biosphärenreservates Spreewald. Den Sponsoren des 20. Symposiums sei ganz herzlich für ihre organisatorische, materielle und finanzielle Unterstützung gedankt. Im Einzelnen sind dies: Vattenfall Europe Mining & Generation AG, acp-IT AG, Stuttgart, Scientific Computers GmbH, Aachen, DUALIS GmbH IT Solution, Dresden, Bausch-Gall GmbH, München, TLK Thermo GmbH, Braunschweig, INCONTROL Simulation Solutions, Wiesbaden, Additive Soft- und Hardware für Technik und Wissenschaft GmbH, Friedrichsdorf, Technosatz Cottbus, Kunstmuseum Dieselkraftwerk Cottbus, Stadtverwaltung Cottbus, BTU Cottbus. Insbesondere bin ich der Leitung und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Verwaltung und des IKMZ der BTU Cottbus, die die Organisation und die Durchführung des 20. Symposiums Simulationstechnik von der ersten Stunde an mit großem Wohlwollen und intensiver Hilfe begleitet haben, zu großem Dank verpflichtet.

Allen Teilnehmern des 20. Symposiums Simulationstechnik wünsche ich interessante Vorträge und anregende Diskussionen, lehrreiche Exkursionen und einen intensiven Gedankenaustausch zu aktuellen und künftigen Fragen der Simulationstechnik unter Fachkollegen.

Cottbus, im August 2009

Albrecht Gnauck  
Bernhard Luther

# Inhaltsverzeichnis/Contents

## Plenarvortrag/Plenary lecture

<i>C. Cerrato, V. G. Dovì, A. P. Riverberi and A. G. Bruzzone</i> Nanoparticle aggregation – fragmentation modelling in the presence of a source term.....	1
---	---

## Tutorien/Tutorials

<i>T. Pawletta und T. Schwatinski</i> Grundlagen der diskret-ereignisorientierten Simulation und der Echtzeitsimulation auf Basis der DEVS-Theorie.....	7
<i>G. Wagner</i> From Basic Discrete Event Simulation via Object-Oriented to Agent-Based Discrete Event Simulation.....	9

## Modellbildung und Simulation technischer Systeme/ Modelling and simulation of technical systems

<i>F. Voit</i> Mehrfachverwendung von Simulationsmodellen im multi-disziplinären Entwicklungsprozess.....	13
<i>F.-W. Bruns, Y.-H. Yoo und K. Kleiza</i> Hyper-Bonds – Ein einheitliches Konzept zur Verbindung realer und simulierter Transportphänomene.....	20
<i>D. Dammers, F. Tissafi Drissi, M. Giroud, D. Schollän and L. M. Voßkämper</i> Verification of Mixed Signal System Design accelerated by a new Diagnostic Tool-Kit .....	28
<i>M. Rabe, F.-W. Jäkel und H. Weinaug</i> Simulation von Nachhaltigkeitsaspekten im industriellen Umfeld und deren Auswirkungen auf die Simulationstechnik.....	36
<i>J. Mayerhofer, A. Zimmermann and M. Gyimesi</i> Combining Neural Networks and Fuzzy Systems to improve Classification in Machine Vision .....	44
<i>S. Misera und H. T. Vierhaus</i> Fehlerinjektion in SystemC-Simulationen für digitale Hardware.....	50
<i>D. Bräuer und A. Rehkopf</i> Modellbildung und Simulation von Mehrzonenöfen zur Einkristallzüchtung unter automatisierungstechnischen Aspekten .....	58

## **Modellbildung und Simulation nichttechnischer Systeme/ Modelling and simulation of non-technical systems**

*R. Siegfried und B. Schneider*

Referenzmodelle in der Agenten-basierten Modellierung - Anwendung,  
Klassifikation, Standards..... 63

*S. Schnittert, R. Winz and E. von Lieres*

Development of a 3D model for packed bed liquid chromatography  
in microcolumns..... 70

## **Simulation und E-Learning/Simulation and e-learning**

*M. Klug*

Aufbau eines Blended Learning Simulationskurses für die Ausbildung in  
ereignisdiskreter Simulation mit den Simulationspaketen Arena und ED..... 72

*L. Holbein, A. Siemon, B. A. Wardijono und D. Wloka*

Vorbeugender Brandschutz durch Lernsimulationen..... 80

*A. Körner, G. Zauner und G. Schneckenreither*

Ein e-learning System für MMT – Mathematik, Modellbildung und Tools,  
Systemerweiterung und Einbindung von graphischer Modellbildung..... 87

*A. Zimmermann, A. Körner und F. Breitenecker*

Blended-learning mit MAPLE T.A.® in der Lehre für Mathematik und Modellbildung..... 95

*A. Atri, N. Nagele and N. Popper*

A Content Management System for E-learning in Modelling and Simulation ..... 103

*J. Wittmann and S. Hess*

Modeling Actor-Specific Learning Processes on Micro-Level for Evaluations  
in E-Learning Environments ..... 110

## **Simulation und Optimierung/Simulation and optimisation**

*M. Fazekas, M. Wastian, M. Gyimesi and F. Breitenecker*

Topologieoptimierung von rekurrenten Neuronalen Netzen mit Featurevektoren  
variabler Länge mittels Genetischen Algorithmen..... 119

*S. Shakiba and H. Shakouri*

Global optimization in order to find blend composition of gasoline considering  
ethanol as an octane-booster ..... 126

*M. Behrens und S. Engell*

Dynamische Simulation und Optimierung annularer Elektro-Chromatographie..... 131

**Verteilte und Web-basierte Simulation/  
Distributed and web-based simulation**

*M. Litz, A. Bachmann und M. Kunde*  
Framework für die Integration von Simulationscodes zur Unterstützung  
des multidisziplinären Vorentwurfs im DLR ..... 140

*L. P. Feldmann, V. A. Svyatnyy, M. Resch und M. Zeitz*  
Forschungsgebiet: Parallele Simulationstechnik..... 147

*A. Atri, N. Nagele und F. Breitenecker*  
Ein AJAX-basiertes Webinterface zur Simulation diskret verteilter Systeme..... 156

*C. Noack, V. Kantor and G. Wagner*  
A Framework for Multiuser Online Simulations ..... 162

**Simulation in der Medizin- und Umwelttechnik/  
Simulation of medical systems and environmental technology**

*P. Einzinger, M. Gyimesi, N. Popper, F. Miksch and F. Breitenecker*  
Modelling of Reimbursement Schemes in Ambulatory Health Care..... 170

*F. Breitenecker, P. Einzinger, G. Zauner und M. Gyimesi*  
Modellierung von Gesundheitskosten mittels System Dynamics ..... 176

*G. Zauner, C. Urach, F. Miksch, N. Popper, I. Schiller-Frühwirth, G. Endel  
und F. Breitenecker*  
Vergleichende Modellbildung zur Impfstrategie-Evaluierung für PCV7 an Hand  
von Markov Modellen und Differentialgleichungsansätzen ..... 186

*F. Schubert*  
„Computational Elastodynamics“ auf Basis der Finiten Integrationstechnik –  
Methode und Anwendungen ..... 192

*B. Blume und C. Büskens*  
Datenbasierte Modellierung und Simulation von Biogasanlagen mit statischen  
und dynamischen Modellen ..... 202

*U. Jessen, M. Thees und S. Wenzel*  
Simulation von Logistikstrukturen im Umfeld der Biogasproduktion..... 210

**Simulation zur Produktionsplanung und –steuerung/  
Simulation of production planning and control processes**

*P. Thurnher und M. Saler*  
Intelligente Auswahl mobiler Ressourcen mit der Berücksichtigung von  
Qualifikationslogiken und Fähigkeiten zur Bedienung anderer Ressourcen ..... 218

<i>M. Speckle, M. Gruber und M. Saler</i> Evaluierung und Analyse integrationsfähiger Simulation Engines für die Entwicklung komplexer und detaillierter Simulationsmodelle .....	225
<i>W. Hasenschwanz</i> Prozesssimulation in einer Brauerei .....	235
<i>S. Mirciov, R. Schmidmeier, M. Junge und L. Martin</i> Modellgestützte Analyse einer energieeffizienten Fabrik an einem Beispiel aus der Pharmaindustrie.....	256
<i>A. Barth und J. Hesselbach</i> Simulationsgestützte Planung eines energieeffizienten Industrieparks mit intelligenter Nutzung erneuerbarer Energien.....	263
<i>B. Lang und J. Hesselbach</i> Energiebedarfsvorhersage produzierender Unternehmen mithilfe Neuronaler Netze .....	271
<i>N. Weishaar und J. Hesselbach</i> Systemdynamische und agentenbasierte Simulation der energieautarken Produktion auf Basis erneuerbarer Energien .....	278
<i>G. Reinhart und T. Gyger</i> Identifikation impliziter Strategien in der Produktionssteuerung zum Aufbau von Simulationsmodellen.....	286
<b>Simulation von Organisations- und Geschäftsprozessen/ Simulation of organisational structures and business processes</b>	
<i>E. Fongwa, O. Nicolae, M. Diaconescu, A. Gnauck and G. Wagner</i> Agent-based Discrete Event Simulation of a Community-based Financial Portfolio for Business Development .....	294
<i>O. Nicolae, G. Wagner and J. Werner</i> Extending Discrete Event Simulation by adding an Activity Concept for Business Process Modeling and Simulation.....	304
<i>U. Spahn</i> Zusammenhänge erkennen, visualisieren, modellieren.....	312
<b>Die digitale Fabrik/The Digital factory</b>	
<i>C. Stapelfeld, N. Doynov und V. Michailov</i> Neue Lösungsansätze zur Schweißverzugsberechnung .....	318
<i>L. A. Maniu, A. M. Kuczapski and S. Spitzner</i> Fab Logistics Modeling and Optimization with acp-IT's InFrame Synapse Simulation Library and XJtec's AnyLogic: Thin Film Photovoltaics .....	324

<i>R. Frick</i>	
Datenorientierte Modellbildung in der Simulation .....	332

**Modellierung und Simulation in Automotive/  
Modelling and simulation for automotive systems**

<i>S. Kutter, B. Bäker und S. Langhammer</i>	
eVehicleLib - Eine Modelica-Bibliothek zur Simulation von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.....	338

<i>A. Richter, T. Lorenz and F. Köster</i>	
Iterative development of assistance and automation systems based on enhanced simulation and test beds .....	346

<i>H. Müller-Sommer und S. Strassburger</i>	
Ausprägungen und Nutzungsgrad der Logistiksimulation im Umfeld der Automobilindustrie .....	353

**Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme/  
Modelling and simulation of mechatronic systems**

<i>W. Maurer</i>	
Physik und Systemwissenschaft in Aviatik.....	362

<i>R. Hohmann</i>	
Nutationen schwerer symmetrischer Kreisel.....	369

**Simulation im Verkehrs- und Transportwesen/  
Simulation of traffic and transportation systems**

<i>D. Tuna, A. Schöbel, D. Zierl und G. Besau</i>	
Vergleich zweier Fahrplankonzepte mit Hilfe einer Betriebssimulation .....	379

<i>K. Lunde und F. Mast</i>	
Ein Verkehrssimulator zur Simulation des Kommunikationsaufkommens in einem satellitengestützten Mauterfassungssystem.....	385

<i>M. Saler, M. Dobler und P. Thurnher</i>	
Dynamische Lagerstrategieoptimierung in der Distributionslogistik .....	393

<i>D. P. F. Möller, P. Becker, T. Müller and J. Wittmann</i>	
The Impact of Seaborne Transportation on Environmental Challenges: The Role of Simulation .....	396

<i>J. Wittmann, K. Himstedt und D. P. F. Möller</i>	
Ein Pipeliningkonzept zur Modellierung der Passagier- und Gepäckbearbeitung am Flughafen.....	404

**Simulation im Bauwesen und Architektur/  
Simulation in the constructing industry and architecture**

*Š. Emrich, S. Tauböck, S. Mesić, F. Breitenecker, D. Wiegand und N. Popper*  
MoreSpace – Ein mehrfach-hybrider Ansatz zur Simulation der Raumauslastung  
von Großgebäuden ..... 415

*S. Tauböck, M. Bruckner, N. Popper, D. Wiegand, S. Emrich und S. Mesić*  
Ein hybrides Modell zur Simulation von Raummanagement und Räumungszeiten..... 423

**Modellierung und Simulation thermischer Systeme/  
Modelling and simulation of thermal systems**

*M. Nimtz, M. Klatt und H. J. Krautz*  
Untersuchung der Effekte in der CCS-Verfahrenskette - Modellierung der  
CO<sub>2</sub>-Prozess- und Transportkette vom Brennstoff bis zum Reservoir ..... 431

*M. Loeffler, M. Schüler, W. Tegethoff, M. Gräber, N. Stulgies und C. Schulze*  
Aufbau eines Verbundes aus Standard- und Echtzeitsimulatoren  
sowie Hardware für das Design thermischer Systeme ..... 439

**Simulation von Energiesystemen einschließlich erneuerbarer Energien/  
Simulation of power plants including renewable energy systems**

*N. X. Thinh, D. Rahe, A. Bräuer und V. Teucher*  
Konzept für die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Erstellung  
von Energieszenarien für Ho Chi Minh City ..... 449

*E. Merzlikina*  
The obtaining of the energy characteristics models of power plant units  
on the basis of thermal testing results ..... 457

*B. Blume, C. Büskens und D. Wassel*  
Messdatengestützte Modellierung und Simulation einer Gasturbine..... 464

*S. M. Asadzadeh and H. Shakouri*  
Using System Dynamic Modeling to Study the Iranian Power Plants  
Maintenance Strategies ..... 470

*S. Wei and S. N. Islam*  
Analysis of China's Energy Challenges and Problems ..... 475

*N. Sadeghi and H. Shakouri*  
Using Energy of Pressure Reduction Stations in Optimizing Natural Gas  
Supply System..... 484

*N. Sadeghi and H. Shakouri*  
Analysing of the Pricing Impact on Natural Gas Consumption in Residential Sector ..... 487

<i>B. Noche und A. Al-Mansi</i> Stoffstrommanagement von Bioabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle in Biogastreibstoffen .....	490
<i>C. Müller und A. Rehkopf</i> Möglichkeit zu Monitoring und Simulation im Bereich der Gasautomation am Beispiel eines virtuellen Kraftwerks auf Mikro-BHKW-Basis.....	500
 <b>Simulation land-, forst- und wasserwirtschaftlicher Systeme/ Simulation of agricultural systems, forestry and water management</b>	
<i>R. Junghanns, R. Blankenburg und P.-W. Gräber</i> Schadstoffbilanzierung mittels gekoppelter instationärer Strömungs- und Stofftransportmodelle des Boden- und Grundwasserbereichs auf Basis generierter Zeitreihen .....	504
<i>A. Gnauck, B. Luther and W. Krug</i> Simulation of Freshwater Eutrophication: A Case Study for a River-Lake System.....	511
<i>B. Luther, A. Gnauck and W. Krug</i> Parameter Optimisation of an Eutrophication Simulation Model .....	519
 <b>Klimasimulationen/Modelling and simulation of climate change processes</b>	
<i>N. X. Thinh, A. Bräuer, V. Teucher und H. Storch</i> Ermittlung möglicher Überflutungsflächen in Ho Chi Minh City durch einfache Simulation.....	525
<i>N. Downes, K. Moon, H. Rujner and H. Storch</i> The Urban Structure Type Approach as a dynamic analysis and planning module for urban scale climate change and development scenarios.....	533
<i>T. Dach und A. Rehkopf</i> Möglichkeit zu Monitoring und Simulation im Bereich der Gasautomation am Beispiel der CO <sub>2</sub> -Flächenmessung mit Hinblick auf die Multisensortechnik .....	540
 <b>Poster/Posters</b>	
<i>B. Lamek, S. Creutz, F. Schubert und G. Gerlach</i> Effektive Techniken zur Schallfeldberechnung von mehrkanaligen Ultraschallwandlern .....	544
<i>S. Esmaeili and H. Shakouri</i> Optimization model for minimize the marginal power generation cost and marginal pollution cost in the power plant .....	553
<i>M. Bruckner und N. Popper</i> Ein agentenbasiertes Modell eines Fußballspiels in Java.....	556

## **Aussteller/Exhibitors**

*S. Spitzner and L. A. Maniu*

Fab logistics optimization with acp-IT's InFrame Synapse simulation library  
and XJTek's AnyLogic ..... 562

*I. Bausch-Gall*

Modelica-Bibliotheken – ein Überblick..... 563

*M. Loeffler, M. Schüler und W. Tegethoff*

Werkzeuge zur Simulation thermischer Systeme..... 567

**Autorenverzeichnis**..... 572

# Nanoparticle aggregation - fragmentation modelling in the presence of a source term

C. Cerrato<sup>1</sup>, V. G. Dovi<sup>2</sup>, A. P. Reverberi<sup>2</sup> and A. G. Bruzzone<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DIMSET - University of Genova, Dept. of Machinery, Energy Systems and Transports,  
Via Montallegro 1, I - 16145 Genova, Italy

<sup>2</sup>DICHeP - University of Genova, Dept. of Chemical Engineering and Process, Via Opera  
Pia 15, I - 16145 Genova, Italy

<sup>3</sup>DIPTeM - University of Genova, Dept. of Production Engineering, Thermoenergetics  
and Mathematical Modelling, Via Opera Pia 15, I - 16145 Genova, Italy

## 1 Introduction

Particle coagulation and breakage processes have received a growing attention in many research topics. In particular, we refer to the formation of aerosols and smokes, the kinetics of polymer reactions, the clustering of stars in astrophysical dynamics and more recently the nanoparticle synthesis. Two different approaches, namely the discrete and the continuous one, can be adopted to describe the aforementioned processes whose mathematical formalism is usually based on the pioneering works of Smoluchowski [1] and Becker and Döring [2]. In the discrete scheme, the particles are made of multiples of a single unit (atom or monomer) which merges with other single or multiple particles during the coagulation. An opposite process occurs in the fragmentation, where a particle made of several single units splits in two or more fragments with conservation of the total mass. A simple scheme describing such reversible process can be visualized as follows:



where  $C_k$  is a cluster made of  $k$  elements. Assuming that  $c_k$  is the concentration of  $C_k$ , we can write the relevant kinetic equation in its rigorous population balance as:

$$\frac{dc_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-1} k_a(i-j, j)c_{i-j}c_j - 2c_i \sum_{j=1}^{\infty} k_a(i, j)c_j - k_b(i)c_i + 2 \sum_{j=i+1}^{\infty} \beta(i, j)k_b(j)c_j \quad (2)$$

The kernels  $k_a$  and  $k_b$  account for the aggregation and breakage kinetics, respectively. The first term in the right hand side of eq. (2) is a growth contribution explaining the formation of a cluster by synthesis of two elements of mass  $i-j$  and  $j$ . The second one, which is again related to an aggregation process, is a loss term indicating that  $C_i$  may disappear by aggregation of it with a generic cluster of whatever mass. The third one is a loss term related to an autonomous first-order kinetic of  $C_i$  breaking. Finally, the last term accounts for fragmentation of particles of mass greater of  $i$  where  $C_i$  may be created from.  $\beta(i, j)$  is the number of fragments in class  $i$  generated upon breakup of a  $j$ -mass particle.

Unfortunately, eq. (2) can be analytically solved in a very limited number of cases, namely for some classes of aggregations kernels in the absence of fragmentation [3]. However, many numerical techniques have been proposed for the aforementioned equation, where the main difficulty is related to the presence of infinite terms in the summation requiring proper truncation techniques. Among them, the simplest approach is based on a direct discretization scaling with the number of monomers and truncating the summations at a fixed value  $j_{\max}$ . This method, though satisfactory for modelling nanoparticles made of single atoms, proved to be unsatisfactory to simulate aggregates in term of diameters, owing to the extremely heavy computational burden required by the tails of the particle size distribution. An excellent review paper dealing with different numerical schemes to approximate the rigorous population balance is the one of Vanni [4] and we refer the reader to the references quoted there.

In the present work, we propose an analytic method aiming at obtaining explicit expressions of the moments of the particle size distribution for constant values of aggregation and breakage kernels in a slightly different context with respect to the one of eq. (2), namely in case of time-dependent supply of monomers. This choice is motivated by the need of describing particle coalescence/breakup when there is a continuous supply of mass owing, for instance, to a vapour condensation in a fog formation or a chemical reaction in a liquid phase nanoparticle synthesis. We will show that the rate of monomer supply may strongly condition the onset of a steady-state in the second moment of particle distribution, and a critical situation describing a switching between unbounded growth and an asymptotic constant trend will be discussed.

## 2 The Model

From this point on, we will base our discussion on a continuous expression analogous to eq. (2) that reads:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = & \int_0^x k_a(x,x')c(x')c(x-x')dx' - 2c(x) \int_0^\infty k_a(x,x')c(x')dx' - k_b(x)c(x) + \\ & 2 \int_x^\infty k_b(x')c(x')\Omega(x,x')dx' + Q(t)\delta(x-x_0) \end{aligned} \quad (3)$$

where  $c(x)dx$  is the number of particles having mass in the range  $[x, x + dx]$ ;  $Q(t)$  is the rate of monomers supply from the outside and  $\delta(x)$  is the Dirac delta function centered on the monomer dimension  $x_0$ . The function  $\Omega(x,x')$  in the right hand side of eq. (3) is a stoichiometric kernel for a particle of mass  $x'$  that fragments into products of mass  $x$  and  $x'-x$ . Following McCoy and Madras [5], the most commonly used expressions are  $\Omega(x,x')=1/x'$  for random fission and  $\Omega(x,x') = \delta(x-x'/2)$  for midpoint fission, respectively. As pointed out by the same authors [6], the aggregation rate coefficient  $k_a$  can be considered relatively independent of the masses of the coalescing particles in case of Brownian motion over moderate ranges of cluster sizes; therefore this explains the choice of constant  $k_a$  adopted in the present simulations, together with  $\Omega(x,x') = 1/x'$ . The choice of a constant breakage kernel  $k_b$  is mainly due to simplifying reasons in the further application

of the moment method, as will be explained in the following. However, we remember that a model discrimination for breakage kernels has received far less attention in the literature.

The  $n$ -th moment  $M_n$  of particle size distribution is defined as:

$$M_n = \int_0^{\infty} x^n c(x) dx \quad (4)$$

To obtain the  $n$ -th moment equation, we multiply both sides of eq. (3) by  $x_n$  and we integrate with respect to  $x$  over the total range of particle sizes. Omitting a tedious but straightforward formalism, we obtain:

$$\frac{dM_n}{dt} = k_a \sum_{r=0}^n \binom{n}{r} M_{n-r} M_r - 2k_a M_0 M_n + \left( \frac{2}{n+1} - 1 \right) k_b M_n + x_0^n Q(t) \quad (5)$$

Finally, replacing the integer values of  $n = 0, 1, 2$  in the previous expression, we get:

$$\frac{dM_0}{dt} = -k_a M_0^2 + k_b M_0 + Q(t) \quad (6)$$

$$\frac{dM_1}{dt} = x_0 Q(t) \quad (7)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = 2k_a M_1^2 - \frac{1}{3} k_b M_2 + x_0^2 Q(t) \quad (8)$$

### 3 Results and discussion

The previous expressions are interesting as  $M_0$  accounts for the total number of clusters present at time  $t$ ;  $M_1$  is the total mass of monomers contained in all clusters while  $M_2$  is related to the dimension  $s(t)$  of the average cluster according to the following expression:

$$s(t) = M_2(t)/M_1(t) \quad (9)$$

For instance, in case of nanoparticle growth in liquid phase,  $s(t)$  indicates the average number of atoms contained in the nanoparticles during its synthesis.

Without loss of generality, a power law describing the time dependence of the source term can be assumed, namely:

$$Q(t) = (t + t_0)^\alpha \quad (10)$$

Analogous expression can be found in the work of Davies et al. [7], where the Smoluchowski coagulation equation is studied in the absence of fragmentation for long times according to different monomer feed regimes modelled by the exponent  $\omega$ . The presence of  $t_0$  in eq. (10) is required to avoid singularities for  $t = 0$  when  $\omega < 0$ . From this point on, we will use a new time variable  $\tau = t + t_0$ .

By integration of eq. (7) combined with eq. (10), the first moment can be explicitly obtained according to:

$$M_1(\tau) = M_1(t_0) + \frac{x_0}{\omega + 1} (\tau^{\omega+1} - t_0^{\omega+1}) \quad (11)$$

As expected, this expression simply suggests that the total mass at time  $\tau$  is the sum of the initial and the injected mass. The algebraic manipulations for the second moment require a greater attention. In fact, defining  $\theta = k_b/3$  and combining eq. (8) with the previous expression, we can write:

$$\frac{dM_2}{d\tau} = -\theta M_2 + 2k_a \left( \frac{x_0}{\omega + 1} (\tau^{\omega+1} - t_0^{\omega+1}) + M_1(t_0) \right)^2 + x_0^2 \tau^\omega \quad (12)$$

whence:

$$M_2(\tau) = e^{\theta t_0} M_2(t_0) e^{-\theta \tau} + e^{-\theta \tau} \left( a \int_{t_0}^{\tau} e^{\theta z} z^{2\omega+2} dz + b \int_{t_0}^{\tau} e^{\theta z} z^{\omega+1} dz + c \int_{t_0}^{\tau} e^{\theta z} z^\omega dz + d \int_{t_0}^{\tau} e^{\theta z} dz \right) \quad (13)$$

Where  $a, b, c, d$  are constants depending on  $x_0, k_a, \omega$  and  $M_1(t_0)$ . Besides, we observe that, for any  $\gamma$ ,

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{\int_{t_0}^{\tau} e^{\theta z} z^\gamma dz}{e^{\theta \tau} \tau^\gamma} = \frac{1}{\theta} \Rightarrow \int_{t_0}^{\tau} e^{\theta z} z^\gamma dz \approx e^{\theta \tau} \tau^\gamma / \theta \quad t \gg 0. \quad (14)$$

So, the asymptotic time behaviour of eq. (13) can be obtained in a simpler expression that reads:

$$M_2(\tau \gg 0) = (a\tau^{2\omega+2} + b\tau^{\omega+1} + c\tau^\omega + d) / \theta \quad (15)$$

Finally, from eq. (9), we deduce the average cluster mass for long times  $s(t)$  according to:

$$s(\tau \rightarrow \infty) = \frac{a\tau^{2\omega+2} + b\tau^{\omega+1} + c\tau^\omega + d}{\left[ x_0(\omega + 1)^{-1} (\tau^{\omega+1} - t_0^{\omega+1}) + M_1(t_0) \right] \theta} \quad (16)$$

eq. (16) clearly suggests a crossover exponent  $\omega = -1$  indicating that the feed of monomers is the only discriminant to trigger a constant steady state or an unbounded growing regime. Davies et al.[7] arrived at the same conclusion in their aforementioned study, but they did not consider the case  $\omega < -1$  in their analysis. Therefore:

If  $\omega > -1$  and  $\tau \gg 0 \Rightarrow s(\tau) \approx \tau^{\omega+1} \Rightarrow$  we have no steady-state for long times;

If  $\omega < -1$  and  $\tau \gg 0 \Rightarrow s(\tau) = \frac{d\theta^{-1}}{-x_0(\omega+1)^{-1}t_0^{\omega+1} + M_1(t_0)} \Rightarrow$  a steady-state exists.

If  $\omega = -1$  and  $\tau \gg 0 \Rightarrow s(\tau)$  grows logarithmically;

This can be deduced by a new integration of eq. (7) as eq. (11) is undetermined; again we have no steady-state.

We remember that the presence of a disaggregation process in the present model appears only in the  $\theta$  term. The asymptotic behaviour reported by Davies et al. [7] cannot be recovered from eq. (16) as this expression is undefined in the absence of fragmentation, namely for  $\theta = 0$ .

## 4 Conclusions

In this paper, we have proposed an aggregation-fragmentation model with constant kernels where there is a time-dependent supply of clusters made of single units. In all calculations, we have supposed a random breakage process in the stoichiometry of fission fragments. A power law time dependence for the rate of monomers supply implies the existence of a steady-state only for a given range of exponent values. A direct consequence of these findings can be seen in wet-chemical nanoparticle formation from a liquid phase. In fact, the total mass of atoms bound to the nanoparticles is negligible with respect to the mass of reagents. If the nanoparticles are produced in a batch reactor, a commonly used laboratory technique, we can suppose a constant rate of monomer supply which is consistent with  $\omega = 0$ , thus implying the absence of an asymptotic constant average diameter. We are aware that the hypothesis of constant kernels to describe nanoparticle growth/disaggregation in liquid phase is only a rough approximation requiring an ad-hoc expression for  $k_a$  and  $k_b$  taking into account a dependence from fluid dynamics and/or dimensions of the relevant clusters [8]. However, it is intriguing to note that a steady-state experimentally observed can be obtained in this simple model only provided the rate of interphase atoms supply is particularly slow.

## 5 References

- [1] *M. von Smoluchowski*, Drei Vorträge über Diffusion, Brownsche Molekularbewegung und Koagulation von Kolloidteilchen, Physik Z. 17 (1916) 557-571.

- [2] *R. Becker, W. Döring*, Kinetische Behandlung der Keimbildung in übersättigten Dämpfen, *Ann. Phys.* 24 (1935) 719-752.
- [3] *F. Leyvraz*, Scaling theory and exactly solved models in the kinetics of irreversible aggregation, *Physics Reports* 383 (2003) 95-212.
- [4] *M. Vanni*, Approximate population balance equations for aggregation-breakage processes, *Journal of Colloid and Interface Science* 221 (2000) 143-160.
- [5] *B. J. McCoy, G. Madras*, Evolution to similarity solutions for fragmentation and aggregation, *Journal of Colloid and Interface Science* 201 (1998) 200-209.
- [6] *B. J. McCoy, G. Madras*, Tracer mixing dynamics during aggregation and fragmentation, *AIChE Journal* 48 (2002) 2167-2178.
- [7] *S. C. Davies, J. R. King, J. A. D. Wattis*, The Smoluchowski coagulation equations with continuous injection, *Journal of Physics A: Mathematical and General* 32 (1999) 7745-7763.
- [8] *X. Liu, J. G. Warden, Q. Huo, J. P. Brennan*, Kinetic study of gold nanoparticle growth in solution by Brust-Schiffrin reaction, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 6 (2006) 1054-1059.

# **Grundlagen der diskret-ereignisorientierten Simulation und der Echtzeitsimulation auf Basis der DEVS-Theorie**

Thorsten Pawletta und Tobias Schwatinski  
thorsten.pawletta@hs-wismar.de, t.schwatinski@gmx.de  
Hochschule Wismar, Forschungsgruppe Computational Engineering & Automation  
Philipp-Müller-Str., PF 1210, 23952, Wismar

## **1 Kurzfassung**

Im Tutorial werden Grundlagen der diskret-ereignisorientierten Modellierung und Simulation und spezifische Erweiterungen für die Echtzeitsimulation dargestellt. Im ersten Teil des Tutorials wird ausgehend von systemtheoretischen Grundlagen in die Modellierung ereignisorientierter Systeme mit Ereignisgraphen eingeführt und deren Simulation mit einem 2-Phasen-Scheduler aufgezeigt. Darauf aufbauend werden die grundlegenden Ansätze des Discrete Event System Specification Formalismus (DEVS) nach Bernard P. Zeigler diskutiert. Ein wesentliches Merkmal des DEVS Formalismus ist die klare Trennung zwischen modular-hierarchischer Systemspezifikation und zugehörigen Simulationsalgorithmen. Nach einer Einführung in die grundlegende DEVS Theorie wird auf wesentliche Unterschiede des klassischen DEVS Ansatzes und des Parallel-DEVS Ansatzes eingegangen. Anschließend wird gezeigt, wie der DEVS Formalismus prinzipiell in einer objektorientierten Programmiersprache softwaretechnisch umgesetzt werden kann. Der erste Teil schließt mit der ausführlichen Behandlung von zwei Anwendungsbeispielen ab. Ein Anwendungsbeispiel behandelt die Modellierung und Simulation einer ereignisorientierten Robotersteuerung. Anhand dieses Beispiels wird die unmittelbare Erweiterung eines Simulators zu einem Steuerungssystem motiviert. Ein wesentlicher Aspekt dieser Erweiterung ist die Echtzeitfähigkeit des Simulators.

Systemtheoretische und softwaretechnische Grundlagen der Echtzeitsimulation bilden den Schwerpunkt des zweiten Teils des Tutorials. Ausgehend von den Real Time DEVS (RT-DEVS) Erweiterungen nach Cho und Kim wird in die Spezifikation und Abarbeitung von RT-DEVS eingeführt. Anschließend werden die Vor- und Nachteile von RT-DEVS diskutiert und ein neuer unmittelbar auf Parallel-DEVS aufsetzender echtzeitfähiger Ansatz vorgestellt. Das Tutorial schließt mit der Vorführung des neuen echtzeitfähigen Ansatzes an einem Experimentalroboter.

## **2 Gliederung**

1. Methoden der diskret-ereignisorientierten Modellierung und Simulation
  - 1.1 Modellierung mit Ereignisgraphen (EG)
  - 1.2 Simulation von Ereignisgraphenmodellen (EGM)
  - 1.3 Modellierung auf Basis des DEVS-Formalismus
    - 1.3.1 Classic DEVS Formalismus
    - 1.3.2 Parallel DEVS Formalismus

- 1.4 DEVS-basierte Simulationsalgorithmen
- 1.5 Grundlegende Implementierungsaspekte
- 1.6 Anwendungsbeispiel

## 2. Echtzeitsimulation mit DEVS

- 2.1 Der RT-DEVS Formalismus
- 2.2 Parallel DEVS für Echtzeitsimulation
- 2.3 Vergleich der Ansätze
- 2.4 Anwendungsbeispiel & Vorführung am Experimentalroboter

# From Basic Discrete Event Simulation via Object-Oriented to Agent-Based Discrete Event Simulation

Gerd Wagner

G.Wagner@tu-cottbus.de

Institute of Informatics, Brandenburg University of Technology at Cottbus, Germany  
Konrad-Wachsmann-Allee 1, 03046, Cottbus, Germany

## Abstract

In the area of simulation technology, *Discrete Event Simulation (DES)* represents a fundamental paradigm for simulating both discrete and mixed discrete-continuous systems in a natural way. Following the development of programming languages, the DES paradigm has been implemented in many different ways, using various programming concepts, at different levels of abstraction. While traditional imperative programming concepts and languages (such as Fortran and C) have been used in the past, modern simulation technologies are largely based on object-oriented concepts and languages (such as C++ and Java). Today, in programming language research, agent-oriented programming concepts have been proposed as an extension of the object-oriented approach, mainly for programming complex distributed systems. It remains to be seen if these new programming concepts are also useful for simulation. While general purpose programming languages are based on general computation concepts, which are often rather low-level, a general purpose DES language must be based on a foundational ontology (of objects and events) that supports the faithful modelling of real-world systems.

Traditionally, in the science of modelling and simulation, there was a preference for abstract models of complex systems, such as in the prominent *system dynamics* approach. These kinds of models abstract away from the structure and interactions of individual entities in a complex system. Instead, they are based on averaging and uniformity assumptions, as they are typical for mathematical modelling. Today, in many scientific areas, notably in social sciences, economics and biology, there is a kind of movement away from abstract models of complex systems towards “individual-based” models. These kinds of models, depending on their requirements for representing cognitive agents, can be implemented with object-oriented or agent-oriented programming concepts in a natural way.

The main goal of this tutorial is to show that the DES paradigm provides a foundation for individual-based modelling and simulation, and that it accommodates both object-oriented and agent-based simulation languages and technologies. The tutorial starts from the basics of DES (events, global state variables, state transitions), and then explores how the basic DES paradigm can be extended by addressing the following questions:

- How to use rules for processing events and specifying their effects on the system state and their resulting events

- How to use objects and collections on top of basic DES
- How to add the concepts of space and physical objects, and basic physics simulation
- What are the basic cognitive features of agents and how can they be supported on top of DES
- How to use rules for specifying the behavior of agents

Throughout the tutorial practical examples are used and executed using the *AOR Simulation* framework. The participants are encouraged to experiment with simulation models and run them on their own computer. The required simulation software can be downloaded from <http://AOR-Simulation.org> and will also be provided on-site.

## 1 General topic areas

Discrete event simulation, object-orientation, individual-based modeling, cognitive agent simulation

## 2 Target audience

The tutorial will be useful for researchers as well as for practitioners interested in individual-based modeling and simulation. It will also offer an introduction to Discrete Event Simulation for beginners. The tutorial will assume no prerequisite knowledge of simulation technologies.

## 3 Table of contents

### Part 1: Basic Discrete Event Simulation

- Introduction to DES (45')
  - Dynamic systems
  - Exogenous events and caused events
  - Simulation models
  - First examples: a service queue model and an inventory model
- DES with objects and collections (15')
  - Object types and inheritance
  - An extended service queue model
- DES with physical objects in space (30')
  - Space models
  - Physical objects
  - Basic kinematics and dynamics, collision events
  - Examples:
    - Colliding balls
    - The Schelling Segregation Model with residents as objects

### Part 2: Agent-Based Discrete Event Simulation

- Simple physical agents (30')

- Perception events
- Action events
- Physical agents
- Examples:
  - Bugs living in grid space (“stupid model”)
  - A traffic simulation model
- Simple communicating agents (30’)
  - Messages and in-message events
  - Out-message events
  - Simple beliefs (self-belief-property/value pairs)
  - Examples:
    - The MIT Beer Game supply chain simulation
- Belief-based Tell-Ask-Reply communication (25’)
  - General beliefs (entity/belief-property/value triples)
  - The generic message types Tell, Ask and Reply
  - Examples:
    - Knights and Knaves
- Concluding remarks (5’)
  - Summary
  - Current research challenges

## 4 Teaching method

The tutorial will focus on concepts and examples. It will include some hands-on experience. Interactive presentation style is assumed throughout the tutorial. The participants are welcome to discuss all the ideas to be presented, to suggest their own ideas, and to share their own experiences related to the tutorial topics.

## 5 Presenter’s profile

**Gerd Wagner** received a Master degree in mathematics, a PhD degree in philosophy and a Habilitation degree in informatics from the Free University of Berlin and the University of Leipzig, Germany. He is currently a Professor of Internet Technology at the Brandenburg University of Technology at Cottbus, Germany. His research interests include agent-oriented modeling and agent-based simulation, foundational ontologies, (business) rule technologies and the Semantic Web. He has published more than 90 papers and journal articles in these areas. In recent years, he has been focusing his research on the development of an agent-based discrete event simulation framework, called *AOR Simulation* (<http://AOR-Simulation.org>). He can be reached at <http://www.informatik.tu-cottbus.de/~gwagner/>.

## 6 Relevant publications

- [1] *Mircea Diaconescu and Gerd Wagner: Agent-Based Simulation with Beliefs and SPARQL-based Ask-Reply Communication*. In *Multi-Agent-Based Simulation X*,

Proc. of MABS 2009, the 10th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation, hosted at the 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009), May, 10-15., 2009, Budapest, Hungary. Springer-Verlag Lecture Notes in AI, 2009.

- [2] *Gerd Wagner and Mircea Diaconescu*: AOR-Simulation.org – Cognitive Agent Simulation. In Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009), Decker, Sichman, Sierra, and Castelfranchi (eds.), May, 10-15., 2009, Budapest, Hungary.
- [3] *Gerd Wagner*: AOR Modelling and Simulation – Towards a General Architecture for Agent-Based Discrete Event Simulation. In P. Giorgini et al. (Eds.): Agent-Oriented Information Systems, Springer-Verlag LNAI 3030, pp. 174–188, 2004.
- [4] *Giancarlo Guizzardi and Gerd Wagner*: Towards Ontological Foundations for Agent Modelling Concepts Using the Unified Foundational Ontology (UFO). In: Paolo Bresciani, Paolo Giorgini, Brian Henderson-Sellers, Graham Low and Michael Winikoff (Eds.), Revised Selected Papers of the 6th International Bi-Conference Workshop on Agent-Oriented Information Systems. Riga, Latvia, June 2004. Springer Lecture Notes in Computer Science, volume 3508, pp. 110--124.
- [5] *Jeroen van Luin, Florin Tulba and Gerd Wagner*: Remodeling the Beer Game as an Agent-Object-Relationship Simulation. Proceedings of Workshop 2004: Agent-Based Simulation 5, Lisbon, Portugal, 3-5 May 2004, SCS European Publishing House, 2004.

# Mehrfachverwendung von Simulationsmodellen im multi-disziplinären Entwicklungsprozess

Dr. Florian Voit  
florian.voit@siemens.com  
Siemens AG

Industry Sector, Drive Technologies Division, Standard Drives  
Frauenauracher Straße 80, 91056 Erlangen, Deutschland

## Kurzfassung

Die Verwendung eines gemeinsamen, plattformübergreifenden Modellbaukastens stellt sicher, dass die verschiedenen an der Entwicklung komplexer Produkte beteiligten Disziplinen konsistente Modelle verwenden. Wegen ihrer Modellierungsspannweite von der Systemarchitektur über abstrakte Funktionalität bis zur zeitgetreuen Detail-Implementierung kommt die Beschreibungssprache SystemC zum Einsatz.

Die frühzeitige Spezifikation des dynamischen Verhaltens kritischer Schnittstellen und Systemkomponenten ermöglicht signifikante Verkürzungen der Entwicklungszeiten umfangreicher Entwicklungsprojekte. Das Vorgehen wird am Beispiel der Entwicklung eines Frequenzumrichters erläutert.

## 1 Einleitung

An der Entwicklung komplexer Produkte sind stets mehrere Teams aus verschiedenen technischen Domänen beteiligt. Im einfachsten Fall sind das der elektrische Entwurf und die Software-Entwicklung. Für den Erfolg ist entscheidend, dass die Aufgabenstellung, die Rahmenbedingungen und die Arbeitsergebnisse immer konsistent gehalten werden. Zusätzlich steht die Entwicklungsmannschaft unter dem Druck einer möglichst kurzen Time-to-Market, was die schlichte sequentielle Bearbeitung wichtiger Entwurfsschritte verbietet.

Der traditionelle Ansatz startet mit einer Papier-Spezifikation, die um mannigfache Zusatzdokumente wie Spreadsheets, Grafiken, Flussdiagramme etc. ergänzt wird. Nach diversen FMEAs und Reviews hofft man dann auf Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit.

Ziel des neuen Ansatzes ist die Verwendung von ausführbaren Spezifikationen. Diese können frühzeitig in allen denkbaren Szenarien getestet werden und bilden während der weiteren Entwicklungsphasen die Referenz („Golden Device“). Die Verfeinerung dieses Modells erlaubt die permanente Überprüfung der statischen Schnittstellen und des dynamischen Verhaltens mit den Vorgängermodellen und sichert somit die Konsistenz über die Abstraktionsebenen hinweg in allen Entwicklungsphasen.

## 2 Multi-disziplinärer Entwicklungsprozess

Bei der Entwicklung eines Frequenzumrichters für die Antriebstechnik kommen mehrere Teams zum Einsatz, die möglichst viele Tasks selbständig und parallel zueinander ausführen sollen:

- Systemtechnik,
- Entwurf Leistungselektronik,
- Entwurf Steuerungselektronik,
- Software-Entwicklung,
- Entwurf ASIC bzw. FPGA,
- Typ- und Systemtest.

Typischerweise laufen Entwicklungsprojekte in folgenden Phasen ab:

- Das ASIC-Entwurfsteam startet das Design mit diversen Annahmen und Vermutungen über die spätere Verwendung seiner Chips und steht bis zum Vorliegen der ersten brauchbaren VHDL-Implementierung unter erheblichem Zeitdruck.
- Um das neue ASIC herum entwerfen die Elektroniker dann eine Hardware-Plattform, die anschließend als Labor- oder Testmuster der Software-Entwicklung zur Verfügung gestellt wird.
- Das Software-Team hat zwar unter Zuhilfenahme von Evaluation-Boards und Entwicklungs-Kits bereits die Funktionsentwicklung vorbereitet, aber für die Treiberentwicklung und Überprüfung kritischer Timings benötigt es „originale“ Hardware in Form o.g. Muster.
- Nach Abschluss der Software-Entwicklung findet die Systemintegration statt. Das integrierte Produkt wird vom Systemtest validiert und verifiziert. Im Fehlerfall muss in eine frühere Projektphase zurückgesprungen werden.

Die sequentielle Abarbeitung des Entwicklungsauftrags bedingt lange Projektlaufzeiten. Es wäre wünschenswert, unmittelbar nach der Spezifikation der Funktionalität in voller Parallelität arbeiten zu können. Dazu ist es notwendig, auf die konkreten Implementierungen der zuliefernden Disziplinen zu verzichten und stattdessen ein dynamisches Modell zu verwenden, das dem jeweiligen Entwicklungsfortschritt angepasst wird. Dieses frühzeitige, abgestimmte Modell nennt man oftmals auch „Ausführbare Spezifikation“.

## 3 Einsatz von Modellen

Jeder Entwickler erzeugt in seiner eigenen Domäne individuelle Modelle, mit denen er spezifische Fragestellungen untersucht. Dazu ist die Modellierung einer Umwelt notwendig, um das spezifische Detail-Modell zu stimulieren und den Simulationsversuchen einen geeigneten Rahmen zu geben. Hier besteht ein großes Inkonsistenz-Risiko, da Design-Änderungen einer benachbarten Disziplin in der eigenen Umwelt

nachvollzogen werden müssten, aber oftmals gar nicht wahrgenommen werden. Außerdem wird bei der Erzeugung einer Umwelt vielfach Mehrfacharbeit geleistet, da Systemteile nachgebildet werden, die andere Kollegen bereits modelliert haben.

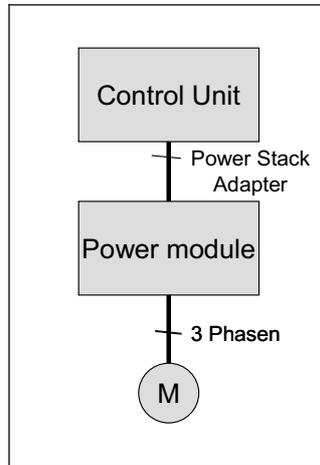
Ausgangspunkt des integrierenden Ansatzes ist ein gemeinsames Basismodell. Idealerweise verwendet man die oben genannte ausführbare Spezifikation. Je nach individueller Fragestellung werden dem Basismodell spezifische Modellverfeinerungen hinzugefügt, die sich jedoch streng an die vorgegebenen gemeinsamen Schnittstellen halten müssen. Das Modell wächst während des Entwicklungsprojektes. Je nach benötigter Detaillierung der zu simulierenden Funktionen kann man fremde Modellteile übernehmen und in die eigenen Simulationsuntersuchungen einbauen.

An die Modelle ist eine Reihe von Anforderungen zu stellen. Sie müssen Hierarchien unterstützen, modular aufgebaut sein und unterschiedliche Abstraktionsgrade bzw. Detailtreue abbilden. Unabdingbar ist die Integration in Domänen-spezifische Entwicklungsumgebungen, denn keine Disziplin wird auf ihr gewohntes Design- oder Simulationswerkzeug verzichten wollen. Ein Beschreibungsmittel, das alle Domänen gleichermaßen abdeckt, ist daher nicht notwendig. Der Modellimport bzw. eine simulationstechnisch exakte Co-Simulation sind ausreichend.

Berichte aus der Mobiltelefon-Entwicklung, aber auch eigene Voruntersuchungen in Pilotprojekten haben gezeigt, dass SystemC eine ebenso mächtige wie vielversprechende Beschreibungssprache ist. SystemC-Modelle können während des Entwicklungsfortschritts reifen und sind dabei portabel, um in die unterschiedlichsten Entwicklungsplattformen eingebunden zu werden.

## **4 Modellierung eines Frequenzumrichters**

Ein Frequenzumrichter besteht aus unterschiedlichen Komponenten und Baugruppen. Die Control-Unit enthält Digital- und Analogelektronik, Software, Kommunikationsschnittstellen und ein Interface zum Power module. Letzteres enthält im Wesentlichen die Leistungselektronik und eine Digitallogik, die die Leistungselektronik steuert und das Interface zur Control-Unit bedient. Die Digitallogik wird entweder als ASIC oder als FPGA implementiert.



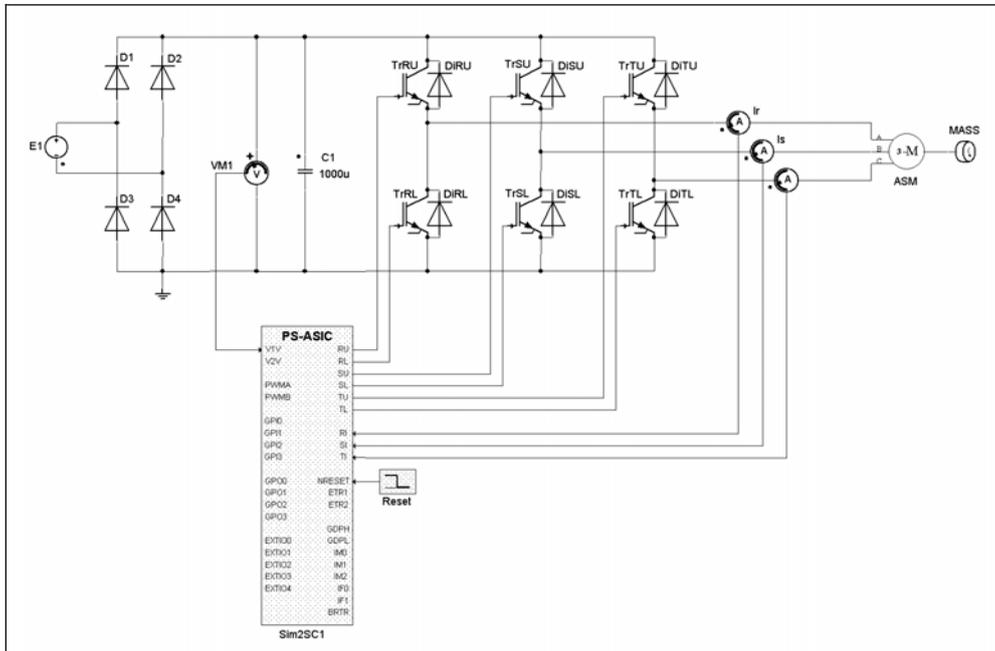
**Bild 1:** Aufbau Frequenzumrichter

Die Modellierung dieses ASIC erfolgt in mehreren Stufen. An oberster Stelle steht ein System-Architektur-Modell, das die Funktionsgruppen und ihre Abhängigkeiten enthält. Damit lässt sich die zu modellierende Funktionalität aufteilen und den Modellblöcken zuweisen. Dabei legt man aber keine Implementierungsdetails fest und kann später immer noch entscheiden, ob man z.B. eine Funktion per Hardware oder per Software realisieren möchte. Dieses Modell erfüllt die funktionalen Anforderungen gemäß Lastenheft und stellt die Kausalität und Reihenfolge von Ereignissen sicher. Ein genaues Timing ist im Regelfall nicht modelliert.

Auf das System-Architektur-Modell aufbauend werden die Detail-Features spezifiziert. Algorithmen werden verglichen und selektiert, Module auf Eignung überprüft und ein Ungefähr-Timing dokumentiert. Die typischen C/C++-Bibliotheken wie die *C Standard Library* und die *STL* sowie beliebige andere Bibliotheken stehen zur Verfügung und erleichtern die Festlegung der gewünschten Funktionalität. Es wird das Was, aber noch nicht das Wie konkretisiert.

Schließlich können Detail-Lösungen spezifiziert und mit einem exakten Timing versehen werden. Das resultierende Modell ist einerseits ein sehr getreues Vorbild für die noch folgende Implementierung in VHDL-Code. Andererseits lässt es sich für die Nachbildung der Modellumwelt der anderen Domänen verwenden, wie sie z.B. das Software-Design und die Elektronikentwicklung benötigen.

Bild 2 zeigt, wie das SystemC-Modell des ASIC bei der Simulation der Leistungselektronik im Simplorer zum Einsatz kommt. Die Schnittstelle zwischen Simplorer und SystemC ist eine proprietäre Eigenentwicklung.



**Bild 2:** Simplorer-Modell der Leistungselektronik mit SystemC-Modell des ASIC

Auch die Einbindung des SystemC-Modells in Simulink ist möglich. Zusammen mit einem Simulink-Verhaltensmodell von Leistungselektronik plus Motor lässt sich die Simulation eines kompletten Power modules realisieren. Dabei sieht die Control-Unit das gleiche Interface wie in der Realität und hat dieselben Einstellmöglichkeiten wie beim echten, physikalischen Power module. Die steuerungs- und regelungstechnischen Algorithmen der Control-Unit lassen sich in dieser Umgebung sehr komfortabel und realitätsnah entwickeln und testen. Die Schnittstelle zwischen Simulink und SystemC ist ebenfalls eine proprietäre Eigenentwicklung.

Dasselbe SystemC-Modell kann auch für die Entwicklung eines Software-Treibers der Control-Unit verwendet werden. Dazu ist die Einbindung des Modells in die jeweilige Software-Entwicklungsumgebung notwendig. Derzeit ist dies für das Microsoft Visual Studio sowie für Eclipse mit dem GNU-C-Compiler möglich.

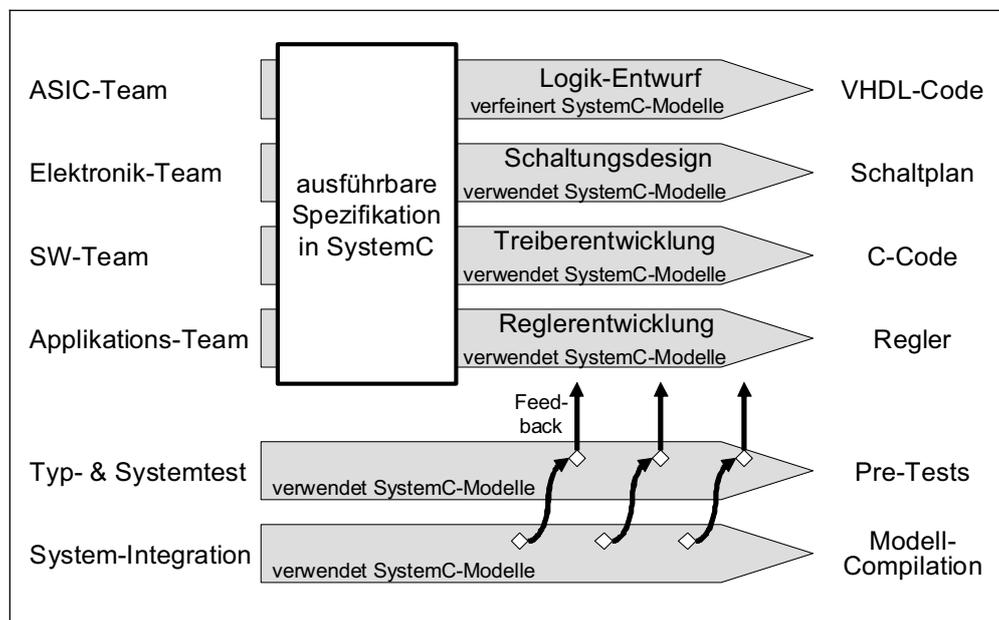
Der Charme des hier dargestellten Ansatzes ist, dass dasselbe Modellgerüst in allen beteiligten Disziplinen verwendet wird. Es entfällt der bisherige Aufwand, je nach Zielumgebung das technische System neu modellieren zu müssen. Das Risiko inkonsistenter Modelle ist minimiert, obwohl das Modell während der Entwicklungsprojektphasen wächst und reift.

## 5 Modellverwendung in den Entwicklungsphasen

Bild 3 verdeutlicht die resultierende Parallelität der Teams. Die früher notwendige Aufeinanderfolge der Aktivitäten wird aufgelöst. Ohne Einbußen an Entwicklungs-

komfort kann jede Disziplin ihrem individuellen Entwicklungsprozess folgen. Durch die verstärkte Verwendung von Simulationstechniken ist der Einblick in die Entwurfsdetails und die Unterstützung der Fehlersuche sogar gestiegen.

Ergänzend zu den Entwurfsaktivitäten kann nun die System-Integration bereits in sehr frühen Projektphasen die vorhandenen Modelle und die entstehenden Original-Designs zusammenführen und der Typ- bzw. Systemtestgruppe die Durchführung von Vorab-Tests ermöglichen. Zum einen wird dadurch die Wahrscheinlichkeit von Überraschungen in der finalen Testphase verkleinert, zum anderen können einige ausgewählte Tests per Ergebnisübertrag vorgezogen werden. Die abschließende Systemtestphase wird kürzer.



**Bild 3:** Entwicklungsprojekt

## 6 Zusammenfassung

Die gezeigte Vorgehensweise hat viele Vorteile: Sie sichert die Konsistenz der Entwicklungsergebnisse, verhindert Aufwand für redundante Modellierungen und verringert die Wahrscheinlichkeit von Überraschungen im Systemtest. Sie verkürzt somit die Entwicklungsprojektzeit. Es werden weniger physikalische Testmuster aus der Fabrik benötigt, was wiederum Kosten spart und Störungen im Fabrikablauf minimiert.

## 7 Literatur

- [1] *Black, D. et al.*: SystemC: From the Ground Up. Berlin: Springer, 2007.
- [2] *Grötter, T. et al.*: System Design with SystemC. Berlin: Springer, 2002.
- [3] *Eichler, U.; Knöchel, U.; Altmann, S.; Hartong, W.; Najibi, T.*: An integrated co-simulation interface for mixed-level system-on-chip design. Conference "CDNLive!", San Jose, USA, 2007
- [4] *Voit, F.*: Methodik zur ereignisdiskreten Modellierung und effizienten Simulation komplexer Systeme. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- [5] *Open SystemC Initiative (OSCI)*: <http://www.systemc.org>
- [6] *Ansoft LLC*: <http://www.ansoft.com/products/em/simplorer>

# Hyper-Bonds – Ein einheitliches Konzept zur Verbindung realer und simulierter Transportphänomene

F.-Wilhelm Bruns, Yong-Ho Yoo und Karolis Kleiza  
bruns@uni-bremen.de, yong-ho.yoo@dfki.de, karolis.kleiza@artec.uni-bremen.de  
Forschungszentrum artec / Universität Bremen  
Enrique-Schmidt-Str. 7, 28334 Bremen

## Kurzfassung

In gemischt real-virtuellen Wirklichkeiten (Mixed Reality) werden Simulationsmodelle im Computer mit realen externen Objekten über Interface auf Signalebene verbunden. Üblicherweise setzen diese Interface eine umfassende Kenntnis der virtuellen, wie der realen Verhältnisse voraus. Ein Interface auf Energieebene, das mit lokaler Information über die Verhältnisse an der Schnittstelle auskommt, bietet neue Möglichkeiten für die Modellierung gemischter Wirklichkeiten. Energieflüsse können mit Hilfe von Bond-Graphen in einheitlicher Form modelliert werden, sodass sich Transportphänomene der Elektrotechnik, Mechanik, Thermodynamik u.a. in nur einer graphischen Notation repräsentieren lassen. Für die Verbindung realer und virtueller Systemteile aus diesen Bereichen wurde ein Konzept entwickelt, das auf der Basis der Kontinuitätsbedingung für den Leistungsfluss ein lokal operierendes Interface zwischen simulierendem Computer und realer Umgebung ermöglicht. Die Möglichkeiten und Grenzen eines derartigen *Hyper-Bond* Interfaces werden vorgestellt.

## 1 Einleitung

Ziel unserer Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer einheitlichen Theorie der Kopplung virtueller (computerinterner) und realer (computerexterner) Elemente in verteilten Systemen, sowie deren prototypische Implementierung in ausgewählten Gebieten der Produktionstechnik. Hierzu wurde die Theorie der Bond-Graphen mit einem Konzept *Komplexer Objekte* zusammengeführt. *Komplexe Objekte* sind zusammenhängende Implementierungen unterschiedlich abstrakter logischer und physischer Instanzen physikalischer Konzepte und Konstrukte, die über *Hyper-Bonds* über ihre Geltungsbereiche hinaus verbindbar sind. *Hyper-Bonds* wurden entwickelt, um Wirklichkeitsausschnitte mit ihren Simulationsmodellen einfach und flexibel zu verbinden. In einem DFG-Projekt wurde das *Hyper-Bond*-Konzept theoretisch fundiert und sein Einsatz für eine Klasse von frei kombinierbaren Simulationsmodellen und Realkomponenten im Design- und Analyseprozess komplexer Maschinen und Anlagen untersucht[1]. Durch das Konzept ergeben sich neue Möglichkeiten für ein verteiltes *physical* und *virtual prototyping*: konkrete Teil-Implementierungen einer Systemspezifikation lassen sich mit alternativen virtuellen Fortsetzungen koppeln und das Gesamtverhalten auch über die Grenze Realität/Virtualität im Zusammenspiel analysieren.

## 2 Motivation

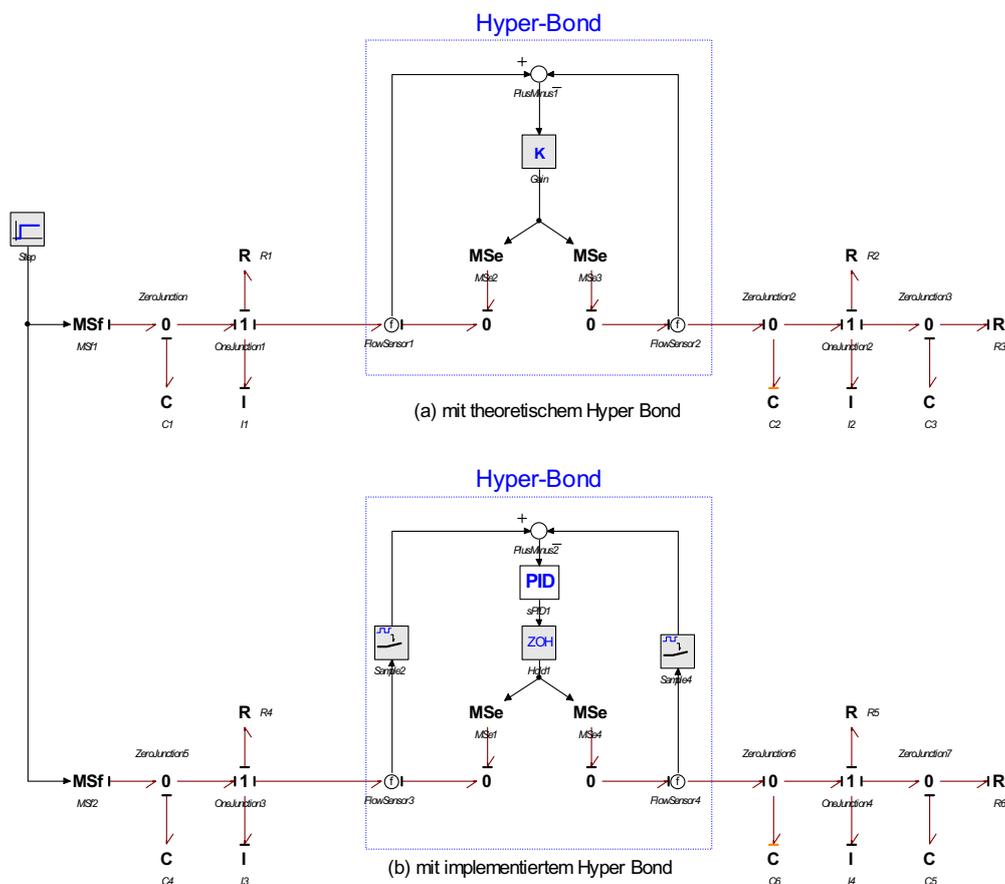
Das DFG-Schwerpunktprogramm *Modellierung der Produktion* (1994-1997) hat einerseits die großen Potenziale der Simulationstechnik verdeutlicht, andererseits aber auch den Bedarf aufgezeigt, virtuelle Modelle mit realen Ausschnitten der Produktion enger zu koppeln.

Das Verhältnis von Realität und Virtualität und deren gegenseitige Durchdringung, auch als *Mixed Reality* bezeichnet, ist Gegenstand zahlreicher Forschungsprogramme, Institute und Konferenzen (ISMAR, ISMR). Erste Arbeiten über *Mixed Reality* waren stark von der Visualisierungstechnik geprägt. Milgram & Kishino [3] führten den Begriff für ein Kontinuum zwischen Realität und Virtualität ein und beschrieben sechs Klassen hybrider Displays, um den gesamten Bereich der Mixed Reality Interfaces abzudecken. Dieser optische Display Begriff erwies sich aber bald als zu eng. In einem weitergehenden Verständnis werden Realkomponenten als Bereicherung der Virtualität verwendet und Simulationsmodelle durch gegenständliches Vormachen spezifiziert [5]. Das virtuelle Simulationsmodell kann nicht nur für systematische Experimente genutzt, sondern auch in ein SPS-Steuerprogramm für reale Automatisierungsanlagen übersetzt und exportiert werden. Hier findet also eine Kopplung zwischen Realität und Virtualität auf einer semiotischen, zeichen- und steuerungstechnischen Ebene statt. Die systematische gegenseitige Durchdringung realer und virtueller Modelle auf energetischer Ebene ist bisher wenig erforscht.

## 3 Hyper-Bonds

Als einheitliches theoretisches Konzept für die Verbindung von Modellen verschiedener Transportphänomen-Bereiche eignet sich die Theorie der Bond-Graphen [4]. Die Theorie der Bond-Graphen betrachtet Systeme aus der Perspektive eines kontinuierlichen Leistungsflusses. Leistung fließt durch Systemkomponenten und Verbindungen nach dem Kontinuitätsprinzip: Das Produkt von Antrieb (Effort) und Fluss (Flow) folgt typischen Energieerhaltungs- und Energieflussgesetzen. *Hyper-Bonds* verbinden nun diese vereinheitlichte abstrakte Beschreibung dynamischer Systeme mit Hilfe von Bond-Graphen mit deren technischer Implementierung. Es sind flexibel handhabbare Schnittstellen zwischen physikalischen Phänomenen der Rechner-Außenwelt und logischen Strukturen der Rechner-Innenwelt. Um diese flexiblen Schnittstellen zu realisieren, muss ein Mechanismus vorhanden sein, der alle relevanten Phänomene messen und wieder erzeugen kann. Hyper-Bonds können mit einem Baukasten aus Sensoren und Generatoren für diese Phänomene realisiert werden. Eine Realisierung für das Gebiet der Elektropneumatik erfolgte für langsame diskrete Kopplungen [2]. Ein realer Druckluftschlauch, vom realen Ventil kommend, wird über einen Hyper-Bond im Virtuellen fortgesetzt und treibt dort einen virtuellen Zylinder an. Die Richtung ist umkehrbar, sodass ein virtuelles Ventil einen realen Zylinder treiben kann. Durch diese bidirektionale Kopplung ist es möglich, mit der Realität die Virtualität zu steuern und umgekehrt. Dies eröffnet Möglichkeiten für einen neuartigen Systementwurf, aber auch für das handlungsorientierte Lernen. Der Ansatz hat starke Bezüge zur Forschung über *Eingebettete Systeme*, unterscheidet sich jedoch von dem dort Üblichen dadurch, dass keine vorhergehende dedizierte Funktionszuweisung

„eingebettet“ und „einbettend“ an die Systemteile erforderlich ist. Das Neuartige am Hyper-Bond Konzept ist seine einheitliche, bidirektionale, lokale Transformation von Effort/Flow Phänomenen. Ein typischer Hyper-Bond, der die Systeme A und B verbindet, ist in Bild 1a dargestellt. Über steuerbare Energiequellen (MSe) wird ein Abgleich der beiderseitigen Leistungsflüsse erzielt. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen einer theoretischen Verbindung mit beliebiger Genauigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit der Adaption und einer Implementierung mit realer Hardware. Für den implementierten Hyper-Bond, der sowohl eine Zeitverzögerung also auch eine Diskretisierung berücksichtigt, ist ein erweitertes Modell erforderlich, Bild 1b.



**Bild 1:** Theoretischer und implementierter Hyper-Bond.

In einer theoretischen Analyse der Stabilität und des Fehlerverhaltens eines durch einen Hyper-Bond verbundenen hybriden (real-virtuellen) Systems im Vergleich zu dem direkt verbundenen System konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die auch in praktischen Simulationsstudien bestätigt wurden. Das Vorgehen wird im Folgenden ausführlicher dargestellt. Als Ergebnis lassen sich zwei Aussagen formulieren.

### Aussage 1

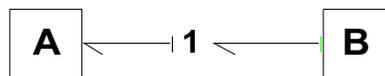
Gegeben sei ein System S, das durch einen Bondgraphen mit R-, C-, I-Elementen beschrieben wird. Dann kann eine Energie-Kante, die das System in zwei disjunkte, nicht-leere Teilsysteme teilt, durch einen theoretischen Hyper-Bond ersetzt werden, der das Gesamtverhalten des Systems innerhalb einer vorgegebenen Fehlertoleranz garantiert. Dieser Hyper-Bond enthält einen Mechanismus, welcher zwei getrennte physikalische Leitungen über einen Regelkreis mit Sensoren und Generatoren so verbindet, dass die Kontinuität des Energieflusses erhalten bleibt.

### Aussage 2

Gegeben seien zwei disjunkte physikalische Teilnetze S1 und S2, die über einen implementierten Hyper-Bond verbunden sind. Dann lässt sich eine Verbindung zwischen realen und virtuellen Instanzen von S1, S2 herstellen, die durch den Regelmechanismus und den Diskretisierungsfehler begrenzt wird und deshalb systemabhängig ist.

## 4 Theoretische Untersuchung zum Übertragungsverhalten von Hyper-Bonds

Es wird versucht die Aussage 1 mit theoretischen Untersuchungen zu validieren. Ein System lässt sich in zwei disjunkte Teilsysteme mit nur einer Energieverbindung aufspalten. Diese Energieverbindung kann dann in einer Bondgraphdarstellung durch einen 1-Knoten mit zwei Bonds, die die zwei Teilgraphen A und B verbinden, repräsentiert werden (Bild 2). Diese Einschränkung der Systemvielfalt erlaubt einen einfachen mathematischen Zugang, und ist trotzdem mächtig genug Transportphänomene zu erklären.



**Bild 2:** Aufteilung eines Graphen in zwei Teilgraphen.

Die Gleichung für das Übertragungsverhalten im Laplace-Raum

$$A(s)f_1(s) + S_A(s)i_A(s) - B^{-1}(s)f_1(s) + B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) = 0 \quad (1)$$

mit den Übertragungsfunktionen  $A(s)$ ,  $B(s)$  für den Fluss  $f_1(s)$  und  $S(s)$  für sonstige Inputs  $i(s)$  in die Teilsysteme, gilt es zu lösen, um den Fluss an dem 1-Knoten für einen gegebenen Bondgraphen zu erhalten. Für den eingefügten Hyperbond HB ist zu zeigen, dass dieser zu einer Gleichung führt, die eine Approximation der Ausgangsgleichung ist.



**Bild 3:** Hyperbond, eingesetzt zwischen den Teilgraphen.

Der Hyperbond lässt sich an der Energiekante einsetzen, was dazu führt, dass sich der Energieaustausch zwischen den Teilgraphen A und B mit einem rein lokalen Verfahren realisieren lässt (Bild 3). Der in Bild 1 gezeigte Hyperbond lässt sich mathematisch berücksichtigen und führt zu der Gleichung

$$A(s)f_A(s) + S_A(s)i_A(s) - B^{-1}(s)f_A(s) + B^{-1}(s)S_B(s)i_B(s) + \underbrace{\frac{S_B(s)i_B(s) - f_A(s)}{B^2(s)K - B(s)}}_{\text{fehlerterm}} = 0$$

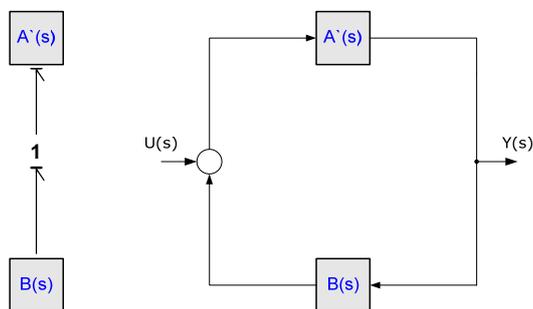
Diese Gleichung zeigt die Ähnlichkeit mit dem System ohne Hyperbond. Lediglich der Steady-State-Fehlerterm ist zusätzlich vorhanden. Dieser ist von K abhängig. Für K gegen unendlich konvergiert der Fehlerterm gegen null.

Eine Stabilitätsuntersuchung lässt sich aus der Passivitätsuntersuchung ableiten. In [1] wurde gezeigt, dass der theoretische Hyperbond die Passivitätseigenschaften nicht ändert und das Gesamtsystem absolut stabil bleibt, solange die Teilsysteme A und B stabil sind. Somit ist Aussage 1 für ein System mit einem Hyperbond gültig. In [1] wird zusätzlich auf ein System mit mehreren Hyperbonds eingegangen, die sowohl parallel, als auch seriell geschaltet sind. Dieses Szenario ermöglicht mehrfache und komplexere Übergängen zwischen virtuellen und reellen Teilsystemen.

## 5 Praktische Untersuchung zum Übertragungsverhalten von Hyper-Bonds

Am Beispiel ausgewählter Hyper-Bonds kann der Gültigkeitsbereich von Aussage 2 aufgezeigt werden. In der praktischen Implementierung einer HB Verbindung muss ein diskretes Modell mit Integration realitätsnaher Komponenten, wie Sensoren, Generatoren, A/D-D/A-Wandler im Computer realisiert werden. Dafür wird die theoretische Analyse von Passivität, Stabilität und Fehler mit entsprechenden Parametern realitätsnaher Komponenten um ein diskretes HB Modell erweitert.

Es ist bekannt [6], dass Systeme, die auf Messungen angewiesen sind, typischerweise aktiv sind. Die Sampling-Rate der A/D und D/A Komponenten im betrachteten System führt zu einem Verlust in den Signalen, der zu einer scheinbaren Aktivität in dem Subnetz HB und damit zur Instabilität führen kann. Es stellt sich die Frage, welcher Parameter dafür verantwortlich ist. Das heißt, die optimale Regelung von Parametern, wie Gain K und Sampling-Rate des HB müssen gefunden werden. Dafür wird die folgende Closed-Loop Feedback System Analyse angewendet. Ein Energienetzwerk (Bild 4 links), das aus zwei Teilsystemen A und B besteht, die über eine Energiekante verbunden sind, kann durch ein entsprechendes Signal-Block-Diagramm (Bild 4 rechts) repräsentiert werden, indem die beiden Energieparameter Effort und Flow zwischen A und B als gekoppelte Input/Output-Größen interpretiert werden. Es lässt sich dann das System A-B als geschlossener Regelkreis analysieren (Closed-Loop Feedback System).

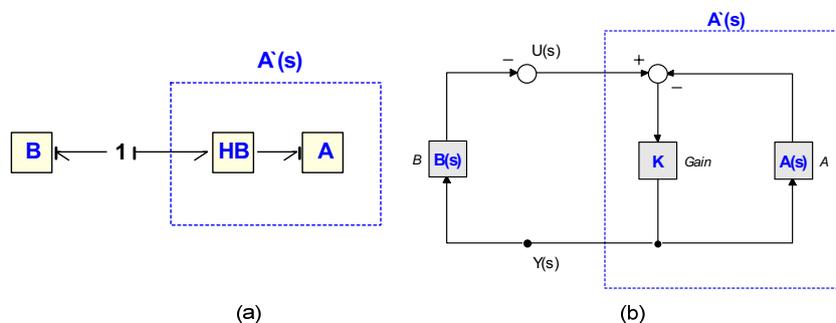


**Bild 4:** Repräsentation vom Energienetzwerk zum Signal-Block-Diagramm.

Die Übertragungsfunktion eines derartigen Systems ist:

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{A'(s)}{1 + A'(s)B(s)} \quad (3)$$

Die Pole von Gleichung 3 müssen innerhalb der abgeschlossenen linken komplexen Halbebene liegen, damit das System stabil ist. Die charakteristische Gleichung ist  $1 + A'(s)B(s) = 0$ . Wenn ein HB zwischen Teilnetzwerk A und B eingefügt ist, kann das Teilnetzwerk A und der Hyperbond als Teilnetzwerk A' betrachtet werden (Bild 5).



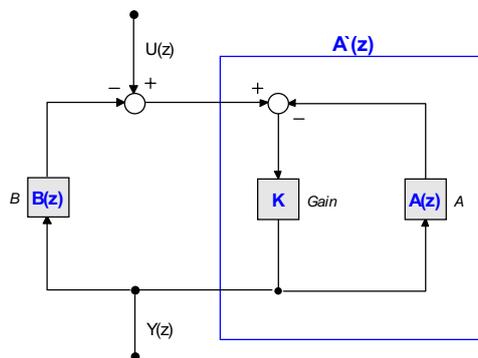
**Bild 5:** Ein Energienetzwerk mit Hyperbond (a) und Signal-Block Diagram für das Energienetzwerk (b).

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{A'(s)}{1 + A'(s)B(s)} \quad (4)$$

$$A'(s) = \frac{K}{1 + KA(s)} \quad (5)$$

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{K}{1 + KA(s)}}{1 + \frac{KB(s)}{1 + KA(s)}} = \frac{K}{1 + K\{A(s) + B(s)\}} \quad (6)$$

Die Pole von Gleichung 6 müssen innerhalb der abgeschlossenen linken Halbebene liegen wenn das System stabil sein soll. Die charakteristische Gleichung ist  $1 + K\{A(s) + B(s)\} = 0$ . Ein kontinuierliches System kann in ein diskretes System durch z-Transformationen überführt werden.



**Bild 6:** Diskrete Repräsentation.

Die Umwandlung von Gleichung 6 mit Hilfe einer z-Transformation führt zu

$$T(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\frac{K}{1 + KA(z)}}{1 + \frac{KB(z)}{1 + KA(z)}} = \frac{K}{1 + K\{A(z) + B(z)\}} \quad (7)$$

Die Pole der Gleichung 7 müssen innerhalb des Einheitskreises in der z-Ebene liegen, damit das System stabil ist. Die charakteristische Gleichung ist

$$1 + K\{A(z) + B(z)\} = 0.$$

An Modellen mit konkreten R-, C-, I- Gliedern, Reglern (K, PID) und Abstraten kann nun die Stabilität und Genauigkeit untersucht werden. Dieses wurde für einige dynamische Systeme in [1] durchgeführt.

Die Untersuchungen zeigen, dass zwei gegenläufige Tendenzen die Implementierung eines Hyper-Bonds beschränken. Die Begrenzung eines Steady-State Fehlers erfordert einen möglichst hohen Verstärkungsfaktor K, dieser hat aber die Tendenz zur Instabilität bei abgetasteten Systemen mit Zeitverzögerung. Durch höhere Abstraten und geringere

Verzögerungszeiten einer optimierten Regelung kann dieser Tendenz begegnet werden. Dieses führt zur Präzisierung der Aussage 2.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung unserer Arbeit mit der Förderung BR 1556/5.

## 6 Literatur

- [1] *Bruns, F.-W., Y.-H. Yoo, K. Kleiza*: Einheitliches Konzept für die Verbindung digitaler und physikalischer Modelle mit Hyper-Bonds – DFG Abschlussbericht VEDIP. Bremen: artecLab-paper 13, 2008, ISSN 1860-9945.
- [2] *Bruns, F. W.*: Hyper-Bonds – Distributed Collaboration in Mixed Reality. Annual Reviews in Control 29, Elsevier, 2005, S. 117-123.
- [3] *Milgram, F., F. Kishino*: A taxonomy of mixed reality and virtual display. IEICE Trans. Inf. & Sys. Vol F77-D, no 12, 1994, S. 1321-1329.
- [4] *Paynter, H. M.*: Analysis and Design of Engineering Systems, MIT Press, Cambridge, MA, 1961.
- [5] *Schäfer, K., F.-W. Bruns*: PLC-Programming by Demonstration with graspable Models. Proc. 6<sup>th</sup> IFAC Sympos. COA. Berlin, 2001.
- [6] *J. E. Colgate, G. G. Schenkel*: Passivity of Class of Sampled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces.

# Verification of Mixed Signal System Design accelerated by a new Diagnostic Tool-Kit

D. Dammers, F. Tissafi Drissi, M. Giroud, D. Schollän, L. M. Voßkämper  
mems@dolphin-integration.com  
Dolphin Integration / SAXO  
Bismarckstr. 142a, 47057, Duisburg

## Abstract

Time-to-market is still required to decrease in state-of-the-art design processes. Reliable verification of complete mixed-signal systems, i.e. logic and mixed signal electronics and systems with their attached peripherals, such as sensors and actuators, is needed to be performed quickly to fit in the enhanced design process. While the verification of the logic part, mostly implemented in Verilog and VHDL, has gained a speed increase through the use of Accellera's Property Specification Language (PSL), the analog part suffers from not being supported by this language. To speed up the verification of the analog part (SPICE, Verilog-A(MS), VHDL-AMS), innovation is needed. Based on the PSL principle, this paper presents an innovative solution for reliable and efficient validation of mixed-signal circuit design which commonly makes use of multiple languages for modeling. As demonstrator, the electrical validation of an embedded memory design is used as starting-point.

Keywords: mixed-signal design rule check, verification rule check, detectors, specification, assertion.

## 1 Introduction

In general, the standardized Property Specification Language (PSL, IEEE 1850) is often used in HDL development design flows for digital hardware design verification. VHDL and Verilog model source code is enriched by the PSL language instructions, as comments in the initial approach, integrated into the languages in upcoming revisions of the standards, or as verification units associated with the models. These instructions allow performing dedicated specification rule checks during simulation. Unfortunately, the PSL language is restricted to event driven aspects.

However, decreased production cycles of mixed-signal systems heavily call for advanced mechanisms in the verification of complete system simulations, i.e. to additionally take into account analog and mixed-signal aspects. This paper describes a new solution to automatically check complete mixed-signal designs using a library of detectors implemented in VHDL-AMS. The application example shows the electrical and timing verification of memory write cycles with help of voltage detectors in a mixed-signal circuit and a tighten integration in the design flow.

The new solution and the methodology<sup>1</sup> behind it are described in chapter "The Observer Tool-Kit". In chapter "The Demonstrator", a typical application of the solution is presented. Inside view of a detector is shown in chapter "Implementation" exemplarily on a voltage-detector. "Conclusion" summarizes the advantages of the proposed methodology for mixed signal circuit design. And, in chapter "Outlook", we explain in which fields the observer solution brings benefits to mixed-signal circuit designers and system integrators.

## 2 The Observer Tool-Kit

The vision that led to the tool-kit implementation was to improve design reliability and security through automated design verifications, thereby bypassing tedious and time-consuming manual waveform analysis. It consists of a VHDL-AMS detector library and a graphical user interface to set up the detectors and add them to the testbench.

Detectors are built to observe specific system characteristics, e.g. to measure currents, voltages, frequencies, slopes, delays, jitters etc., on the condition not to influence the system behavior in the simulation. So the detectors are passive "observers" with respect to the circuit. But they are active with respect to the designer: the detectors announce online, during simulation, when signals violate specification rules and write these events in report files for further analysis. Depending on the severity level set up for the alerts, the simulation can be aborted, paused or continued.

While implementing the detectors, special focus was set on being compatible with any possible applications, for instance through parameterization in order to be adaptable to different specifications. Besides the analog ports for attaching the detectors to the analog/mixed signal circuit nets to be observed, every detector has a logic input port to attach an enable signal and a logic output port to supply a trigger signal to the system. So, the user is able to build more complex specification rule checkers with help of the basic detectors already defined in the library.

The standardized hardware description language VHDL-AMS was chosen to build the library of detectors. On one hand the standard language ensures that designers using diverse simulators supporting multiple languages can benefit from these developments assembled using this library. On the other hand VHDL-AMS offers "assertion statements" to report misbehavior and control of the simulator.

The advantage of using a library of detectors, rather than of using a special language, is that already verified model libraries remain untouched. Detectors can easily be placed inside the schematics of the design to verify and, of course, compounded specification rule checkers can be reused independently from any device/circuit model.

---

<sup>1</sup> The Detector methodology described in the following was developed and partly co-financed in the frame of the EU supported, regional funded project EMSIG (Development and transfer platform for the industrialization of mixed-signal circuits, FKZ 005-0604-0020). European Funds for Regional and Structural Development, regional project Ziel 2 Gebiet

### 3 The Demonstrator

To demonstrate the advantages of this new methodology, we apply voltage detectors on a mixed-signal SRAM (Static Random Access Memory) design for electrical validation of write operations at transistor level. Note: Of course, observing read operations is also possible, but for the demonstration of the advantages write operation check is sufficient. The detectors have to check if the voltage of each bit cell in the memory represents the logic value “1” or “0” at a specific time corresponding to the data input.

The observer toolkit offers two possibilities to integrate the detectors in the testbench. The first is a post generation and the more convenient, since it allows adding a detector network easily to an existing circuit without modifying it. In other words: At first the testbench has to be created. Then the preparation of the list of schematic signals is necessary, since the graphical user interface (GUI) uses this list to generate and set up the detector circuit. Figure 1 shows, the GUI with the available signals of the testbench in the upper pane. Here the designer is able to choose the signals to observe, such as the clock signal, the bit cell voltages, etc. The “CYCLE TIME” pane allows setting the number of read/write cycles. The “DETECTOR TYPE” pane allows setting the type of message level “Failure” or “Warning”. Depending on this, the simulation will be continued, paused or aborted. The last setting is the “STATE VALUE”, which allows setting the observation if the signal goes above or below the specification. The left button adds the selected configuration to the detector circuit setup. The middle button finally generates the detector circuit. The right button is used to close the GUI. In summary: the GUI avoids error prone manual detector circuit creation through generation via a few mouse-clicks. Currently, the GUI-option is restricted to be used with the simulator SMASH<sup>2</sup>.

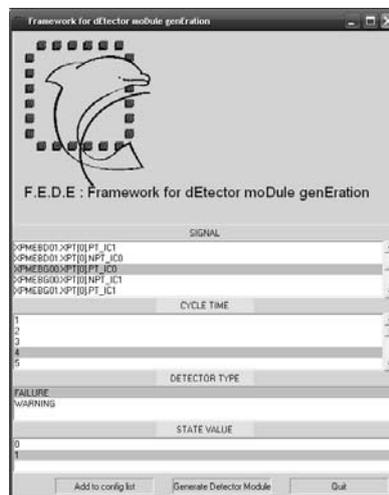
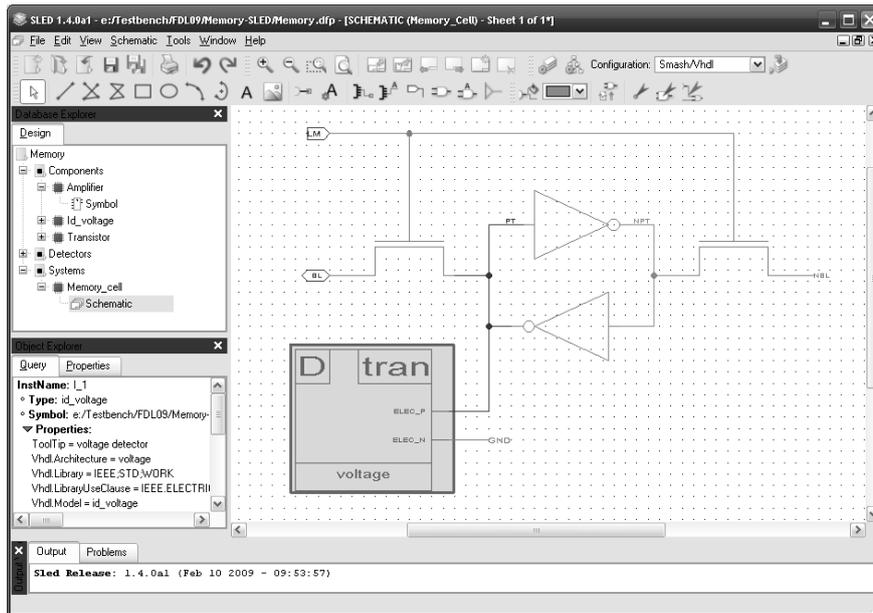


Figure 1: Detector integration GUI

<sup>2</sup> Single kernel, mixed-signal and multi-language simulator by Dolphin Integration

The second possibility is the common way to add the detector directly through connecting the detector symbol to the device to observe via a schematic editor in the test-bench schematic. The screenshot of Figure 2 shows the bit cell schematic with attached voltage detector in the schematic editor SLED<sup>3</sup>. Needless to say that both options lead to the same simulation results.



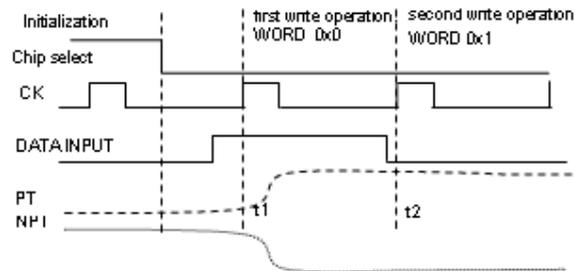
**Figure 2:** Detector integration, schematic editor SLED

In Figure 3, the functionality diagram of the bit cell is shown. The clock signal CK and the DATA INPUT are digital signals, whereas PT is an analog signal and represents the boolean value of the memory cell, where  $V > VDD/2$  is “true” and  $V < VDD/2$  is “false”, whereby VDD is the supply voltage. It has to be checked if the value of PT has the proper value at the end of a write cycle, i.e. at t1 the write operation starts and at t2 the write operation has to be finished; at t2 the detector is triggered to check if PT is above VDD/2. The detector can abort, pause or continue the simulation, depending on the severity level of the alerts, if it detects a wrong value at the end of the write cycle.

The complete testbench of this design contains an electrical modeling of a memory instance. The size of memory is 64 Kbit. We use 8 bit cells to perform the electrical validation of the complete testbench of this design which represents an electrical modeling of a memory instance.

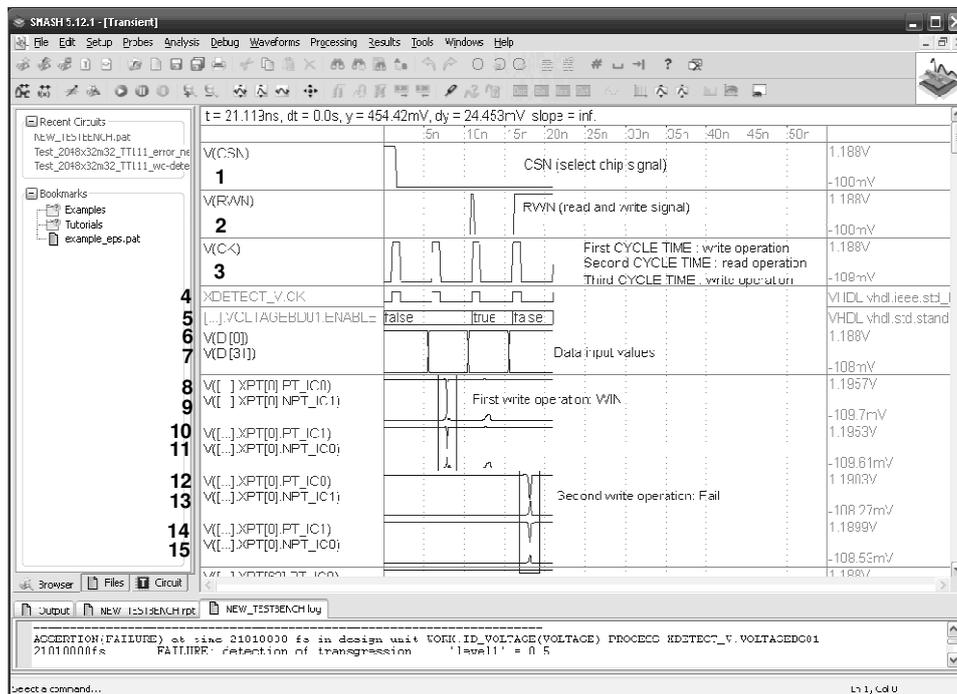
By comparison to the conventional simulation, the fault free simulation with instantiated detectors needs 14.26% more time for one complete verification run on an Intel P4 3GHz Windows PC with 1GB SDRAM using the simulator SMASH release 5.12.1.

<sup>3</sup> Schematic Link EDitor, EDA tool of Dolphin Integration <http://www.dolphin-integration.com>



**Figure 3:** Bit cell functionality

The actual simulated signals are displayed in the transient simulation window online while the simulation is in progress. Figure 4 shows the simulation of the memory design in the simulator SMASH. The first write cycle after initialization is correctly done (see traces 8 to 11). On the second write cycle, a failure occurs (see traces 12 to 15). The detector reliably detects the misbehavior and aborts the simulation immediately as defined previously. At the same time, the error is announced on the screen at the lower pane of the simulator and logged separately for later off-line analysis in the detectors report file (see Listing 1).



**Figure 4:** Transient simulation of an erroneous write cycle

The first trace of the simulation shows the chip select signal CSN, which is “1” during the initialization cycle. Trace 2 shows the RWN signal, which is “1” for read operation and “0” for write operation. The analog clock signal and the digital clock signal are shown in trace 3 and 4. As example of a detector enable signal, the enable signal of the bit cell 2 is shown in trace 5. V(DI[0]) (trace 6) shows the data input value for the bit cells XPMEBD00.XPT[0] (trace 8) and XPMEBG00.XPT[0] (trace 12), whereas the data input value for the bit cells XPMEBD01.XPT[0].PT\_IC1 (trace 10) and XPMEBG01.XPT[0].PT\_IC1 (trace 14) is shown in V(DI[31]) (trace 7).

A second testbench is used to demonstrate a detector alert where the write operation fails on the second write operation. The fault simulation lasts 2 minutes, 46 seconds and 593 ms CPU time from start to abortion on the above mentioned PC using the same release of SMASH. Compared to the simulation over the full period of eleven cycles, the time saved for checking the design is 12 minutes, 18 seconds and 969 ms. Since it is difficult to estimate the time used by the designer to observe all signals, this time is neglected, but not forgotten in this consideration. But, significantly more important than the saved time, detectors, in opposite to a tired designer, always detect unfaillingly the fault! In the lower pane of the simulator (Figure 4), the detector alert of a specification violation caused by bit cell XPMEBG01.XPT[0] is shown (trace 14). The corresponding log-file is shown in Listing 1.

```
** Detector Message Report **
21010000fs FAILURE: transgression at XPMEBG01.XPT[0] 'level1'=0.5
```

**Listing 1:** Detector log-file

The configurable detector messages allow easy and reliable location of faulty circuit elements. For further analysis or in order to document the simulation runs, the designer has the possibility to enable the detector log-file, where it is also possible to configure the log-text. The log-files are simple text files in order to be accessible from any other application. This means that detectors facilitate the observation of important signals in the circuit, so that design productivity/security is noticeably increased.

## 4 Implementation

The GUI was developed in Perl/Tk. To use it no further preparations are necessary then the generation of the list of schematic signals. The shown voltage detector is one piece of the Detector library implemented in VHDL-AMS. The advantage of this library, in opposite to add assertion checks every time again in new “device-model” source code, is the reusability. We use separate models for detectors and since the detector models possess an enable input for activation and a trigger output they can be assembled to build more complex detectors. Currently, the library comprises detectors to observe voltage, current, power, resistance, conductance, voltage at a specific time, current at a specific time, delay, frequency, frequency jitter, ratio, slew rate, rise time, fall time and generic edge. These manifold detectors make use of VHDL assertion statements to announce their alerts and report them.

Special care was set to not influence the systems behavior while implementing the detectors as demonstrated in Listing 2, where a part of the implementation of the voltage detector in VHDL-AMS is shown. One can see that the model has two electrical terminals, “elec\_p” and “elec\_n”, where only the across quantity i.e. the voltage  $v_{test}$ , is used to detect if  $v_{test}$  is above a limit, see “PROCESS ( $v_{test}$ 'ABOVE(level1),  $v_{test}$ 'ABOVE(level2),Enable) IS”. I.e. the quantities are used for “measurement”; no manipulation will be performed. PROCESS(transgression) generates the assertion message, as well as the report file. Depending on the severity level, the simulation will be continued, paused or aborted, see line “message\_type : SEVERITY\_LEVEL := ERROR”.

```

7.  ENTITY id_voltage IS
8.    GENERIC level1 : VOLTAGE := 0.0; level2 : VOLTAGE := 0.0;
9.    detector_type : DETECTION_TYPE := Range_in;
10.   message_type : SEVERITY_LEVEL := ERROR,
11.   transgression_message: STRING := " V out of range";
12.   rearranged_message  : STRING := "V back in range";
13.   file_name : STRING := "V-observer.rpt ";
14.   PORT (TERMINAL elec_p, elec_n: ELECTRICAL;
15.        SIGNAL Enable: IN BOOLEAN; SIGNAL Trigger: OUT BOOLEAN);
16. END id_voltage;
17. ARCHITECTURE voltage OF id_voltage IS
18.   QUANTITY v_test ACROSS elec_p TO elec_n;
19.   SIGNAL transgression : BOOLEAN := FALSE;
20.   SIGNAL msg_type      : STRING(1 TO 10) := " WARNING: "; BEGIN
21.   PROCESS(v_test'ABOVE(level1),v_test'ABOVE(level2),Enable) IS BEGIN
22.     IF Enable THEN
23.       IF level1<level2 THEN
24.         IF v_test>level2 THEN
25.           CASE detector_type IS
26.             WHEN ABOVE_1 => transgression <= TRUE;
27.             WHEN BELOW_1 => transgression <= FALSE; ...71. END PROCESS;
72.   PROCESS(transgression) IS BEGIN
73.     IF transgression THEN
74.       IF detector_type = ABOVE_1 OR detector_type = BELOW_1 THEN
75.         write_detector_messages(file_name => file_name, message
=> time'image(NOW) & "fs" & character'VAL(9) & msg_type& transgres-
sion_message & character'VAL(9) & " 'level1' = " & real'i-
mage(level1) & character'VAL(9) & character'VAL(9) & ". ");
76.         ASSERT FALSE REPORT time'image(NOW) & "fs" & charac-
ter'VAL(9) & msg_type & transgression_message & character'VAL(9) &
" 'level1' = " & real'image(level1) & character'VAL(9) & charac-
ter'VAL(9) & ". " SEVERITY message_type; ...

```

Listing 2: Implementation of the voltage-detector (shortened)

## 5 Conclusion

It has been shown that with the use of the proposed methodology, the designer is able to create and compose specification rule checkers by using the parameterized basic detectors. Critical design parts can be observed continuously. During simulation, the detectors reliably check whether the design operates in its specifications and raises exceptions oth-

erwise. Consequently, the verification phase can be automated which avoids error prone manual analysis of signal traces. The compliance of the design specification, and therefore the overall functionality of a circuit, can be totally observed with dedicated detectors. This increases the comprehension of the design and of the influence of certain design parameters on the functionality of the circuit, thereby increasing design robustness. Using the Verilog or VHDL assertion statements in the models' source code to observe the behavior of logic designs during simulation is state-of-the-art. The presented innovation is the separation of these assertion statements from the models' source code to build separate observer models so that it can be used in mixed language simulator environments independently from the models' implementation language especially for analog and mixed-signal designs. Furthermore, this approach provides the option to combine the detectors to a more complex one to enable more versatile observations. An application of combined detectors to observe the continuous and peak current specification of a H-Bridge electronics of a stepper motor was already presented in [1]. All this increases designer's productivity and ensures design security through an accelerated automatic checking and reporting of important events. Since the detectors are implemented in a standardized HDL, they guarantee the compatibility of separate application schematics and different simulators and minimize efforts in creating and embedding specification rule checks independently of the overall testbench. The GUI allows a comfortable way to add detectors and set them up without manipulating testbenches itself. This allows reusing the detector-free testbench for further analysis in order to not waste CPU performance unnecessarily.

## 6 Outlook

The detector-GUI can be merged with the schematics editor for a visual selection of signals to observe. Detectors offer diagnostic support in several fields. For mixed-signal circuit design, detectors can be placed at internal nets to observe specification violations. A sequencing method can be used to adapt model parameters to converge to measurements or simulations on lower levels or it can be used for optimizing circuit parameters or for designing robustness tests. Circuit transfer efforts from provider to users can be reduced through providing virtual sockets with detectors on IP's ports to observe specifications independently from HDL/simulator. The actual library comprises several detectors for transient analysis. Further models are being added to address small signal simulations

## 7 Literature

[1] D. Dammers, D. Schollän, L.M. Voßkämper, "Accelerating Mixed Signal System Design Verification using New Diagnostic Method", ASIM-Workshop, March 5-6, 2009 Dresden, Germany, ISBN 978-3-8167-7981-0

[2] S. Max, "Fast Accurate and Complete ADC Testing", Proc. of the IEEE ITC, 1989, pp. 11 1-1 18.

[3] K. Arabi and B. Kaminska, "Parametric and Catastrophic Fault Coverage of Analog Circuits Using Oscillation-Test Methodology," IEEE VLSI Test Symp., 1997, Monterey, pp. 166-171

# **Simulation von Nachhaltigkeitsaspekten im industriellen Umfeld und deren Auswirkungen auf die Simulationstechnik**

Markus Rabe, Frank-Walter Jäkel, Heiko Weinaug  
[markus.rabe; frank-walter.jaekel ; heiko.weinaug]@ipk.fraunhofer.de  
Fraunhofer IPK / Bereich Unternehmensmodellierung  
Pascalstr. 8-9, 10587, Berlin

## **Kurzfassung**

Als Analyse- und Planungswerkzeug ist die Simulation technischer und wirtschaftlicher Sachverhalte aus der Industrie heute nicht mehr wegzudenken. Vor dem Hintergrund von Themen wie Globaler Erwärmung, Kinderarbeit in der Zulieferkette, Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards etc., tritt heute zunehmend das Thema Nachhaltigkeit auf die Tagesordnung. Spezifische Eigenschaften der Nachhaltigkeit sind deren Langfristperspektive sowie die übergreifende Betrachtung ökonomischer, ökologischer und sozialer Fragestellungen. Dieser Beitrag betrachtet die Auswirkungen dieser erweiterten Aufgabenstellung auf die Simulationstechnik und deren Anwendung.

## **1 Einleitung**

Die „Entwicklung zukunftsfähig zu machen, heißt, dass die gegenwärtige Generation ihre Bedürfnisse befriedigt, ohne die Fähigkeit der zukünftigen Generation zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse befriedigen zu können“ [1]: so definiert der „Brundtland-Bericht“ aus dem Jahre 1987 eine nachhaltige Entwicklung. Nachhaltigkeit wird als ein Prozess der Veränderung gesehen, in dem die Nutzung der Ressourcen, die Struktur der Investitionen, die Orientierung des technischen Fortschrittes und die institutionellen Strukturen abgestimmt werden mit den zukünftigen und gegenwärtigen Bedürfnissen, wie beispielsweise Sicherstellung gesunder Ernährung, Ressourcenverfügbarkeit, stabiles und sicheres soziales Umfeld. Neben dem Ziel der langfristigen Zukunftsgerechtigkeit und damit der Generationengerechtigkeit stellte die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags 1998 die Nachhaltigkeit auf „Drei Säulen“ und deutete sie als „Konzeption einer dauerhaft zukunftsfähigen Entwicklung der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension menschlicher Existenz“ [2]. Damit die Betrachtung der Nachhaltigkeit Wirkung erzielen kann, muss sie auf allen Ebenen von Wirtschaft und Gesellschaft Eingang finden.

Die Simulation technischer und wirtschaftlicher Sachverhalte ist heute in der Industrie gängige Praxis. Derzeit umfassen Simulationsmodelle zumeist klar abgegrenzte ingenieurtechnische und physikalische Fragestellungen mit – im Bezug auf Fragen der Generationengerechtigkeit – relativ kurzem Zeithorizont. Will man ökonomische, ökologische

und soziale Nachhaltigkeitsaspekte bewerten, so sind weitere Dimensionen (ökonomisch, ökologisch, sozial) zu beleuchten und zugleich ein Bezug zu Entwicklungen über lange Zeiträume herzustellen. Hierzu bedarf es angemessener Indikatoren sowie der Anpassung von Methoden und Vorgehensweisen der Simulation an die erweiterte fachliche und zeitliche Perspektive. Da Produktherstellungsprozesse überwiegend unternehmensübergreifend definiert und geographisch verteilt sind, lassen sich Nachhaltigkeitsaspekte integrierende Untersuchungen weniger leicht auf Abschnitte eines Liefernetzwerkes eingrenzen als dies für rein materialflusstechnische Überlegungen der Fall ist. Als Beispiele sei die Wahl eines „nachhaltigeren“ Werkstoffes für ein Produkt gegeben, die in späteren Wertschöpfungsstufen ökologisch weniger günstige Beschichtungsverfahren erzwingen oder bei der Endbearbeitung zu höherem Ausschuss führen könnte.

Anwendungen der diskreten Simulation finden sich beispielsweise in der Fabrikplanung, im Fabrikbetrieb zur Entscheidungsunterstützung sowie in operativen Steuerungssystemen. Hier grenzen Entscheidungen auf höherer (langfristiger) Ebene den Entscheidungsspielraum auf den anderen Ebenen ein.

Aus diesen Überlegungen ist abzuleiten, dass die Simulation von Nachhaltigkeit eine stärkere Integration bisher meist getrennt betrachteter Bereiche erfordert, und zwar sowohl auf unterschiedlichen Ebenen des Unternehmens als auch über Unternehmensgrenzen hinweg. Darüber hinaus hat der Lebenszyklus des betrachteten Produktes einen wesentlichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit. Dieser Aspekt soll im vorliegenden Beitrag im Sinne einer sinnvollen Fokussierung jedoch nicht weiter betrachtet werden.

In diesem Beitrag wird zunächst der Stand der Technik in Bezug auf Nachhaltigkeit in der Simulation für Wertschöpfungsnetze analysiert. Danach wird ein konzeptioneller Rahmen für die Simulation solcher Netze vorgeschlagen, wobei nach den Entscheidungsebenen im Unternehmen differenziert wird.

## **2 Stand der Simulation von Nachhaltigkeit im industriellen Umfeld**

Mit Blick auf die Simulation von Nachhaltigkeit im industriellen Umfeld gibt es Vorarbeiten aus mehreren Forschungsfeldern. Als erstes wird kurz beleuchtet, welche Nachhaltigkeitskonzepte Unternehmen und unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsnetzen zur Verfügung stehen. Insbesondere werden *verfügbare Normen und Standards*, deren *Umsetzungsgrad* und die aktuelle Entwicklung in der Forschung betrachtet.

Im zweiten Schritt wird untersucht, welche simulativen Ansätze für *einzelne Produktionsstandorte* und *Wertschöpfungsnetze* nutzbar sind.

Mit Blick auf die Gestaltung und den Betrieb nachhaltiger industrieller Wertschöpfungsnetze sind Konzepte und Instrumente des Umweltmanagements und Stoffstrommanagements zu berücksichtigen und in ein ganzheitliches Sustainable Supply Chain Management-Konzept zu integrieren. Dazu wurden bereits international gültige *Normen und Standards* definiert. So liefert das Stoffstrommanagement einerseits Lösungen zur Reduktion der Umweltbelastungen durch die Senkung der anthropogenen Materialströme und durch Substitution von Materialien, das Umweltmanagement andererseits definiert Lösungen zur Verbesserung des betrieblichen Umweltmanagements (ISO 14001), der Ökobilanz (ISO 14044) sowie der betrieblichen Umweltleistung (EMAS). EMAS basiert

auf der 1993 von der Europäischen Kommission verabschiedeten „EG-Öko-Audit-Verordnung“, in der geregelt ist, wie sämtliche Auswirkungen des Betriebsstandortes auf die Umwelt erfasst, bewertet und dokumentiert werden sollen. Auf dem Gebiet Social Accountability ist SA8000 der erste weltweit zertifizierbare Standard zur sozial verantwortlichen Unternehmensführung mit neun Themenbereichen wie z. B. Sicherheit am Arbeitsplatz, Organisationsfreiheit oder Diskriminierungsverbot [3].

Allerdings ist der Umsetzungsgrad dieser Standards etwa verglichen mit dem der ISO 9000 weder umfassend noch flächendeckend. Gleichwohl zeigte eine Studie zum Thema Umwelt- und Sozialstandards in der Automobilindustrie bereits 2004 eine insgesamt positive Einstellung zum Themenkomplex Nachhaltigkeit. 97 % der Unternehmen erachten Nachhaltigkeit allgemein als wichtig oder sehr wichtig, 92 % stufen Nachhaltigkeit für die Automobilindustrie als wichtig oder sehr wichtig ein, 79 % halten Umwelt- und Sozialstandards für sehr hilfreich, um Nachhaltigkeit zu fördern [4]. Vordergründig werden von Lieferanten die Standards der ISO 9000, ISO 14001 und EMAS gefordert. Eine Anbindung von umweltfokussierten Managementkonzepten wie z. B. Stoffstrommanagement und Umweltmanagement an das Supply Chain Management ist jedoch bislang nicht festzustellen. Nach einer Studie der ETH Zürich sehen die Unternehmen das Fehlen einer passenden Software als Haupthindernisgrund an, kein Sustainable Supply Chain Management eingeführt zu haben. Allerdings scheitern einige Firmen schon an der Definition von geeigneten Messgrößen und deren Gewichtung, sowie der regelmäßigen Erhebung von Kennzahlen [5].

Zukünftig gilt es, die vorhandenen Techniken zur Simulation in Produktion und Logistik und die Anforderungen bezüglich Nachhaltigkeit, das heißt aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Sicht zusammen zuführen. Hierzu wird ein Rahmenwerk für die unterschiedlichen Simulationsansätze benötigt, um im ersten Schritt deren Beziehungen zu einander strukturieren und im zweiten Schritt die erforderliche Anreicherung um Nachhaltigkeitsanforderungen modellieren zu können. Dabei sind sowohl standortbezogene Ansätze (Fabriksimulation) als auch Ansätze zur unternehmensübergreifenden Simulation von Wertschöpfungsnetzen zu berücksichtigen.

*Simulative Ansätze für einzelne Produktionsstandorte*, insbesondere die Simulation einzelner Aspekte von Fabriken bis hin zu deren Vernetzung in der „digitalen Fabrik“, werden bereits seit vielen Jahren erfolgreich angewandt. Dabei werden Simulationsmodelle sowohl kurzfristig genutzt und wieder verworfen, wie auch in Arbeitsprozessen kontinuierlich eingesetzt. In Anwendungen zur Fabriksteuerung und zum Management wird ebenfalls Simulation zur Planung von Portfolios wie auch zur operativen Programmplanung (z. B. in Fertigungsleitständen) angewendet. Dieses Feld ist breit erforscht, und detaillierte Beschreibungen von Vorgehensweisen, Qualitätskriterien und zur Validierung der entstandenen Modelle sind beschrieben [vgl. z. B. 6, 7].

Für die *Simulation von Wertschöpfungsnetzen* existieren diverse Anwendungen sowohl für unternehmensübergreifende [z. B. 8, 9] als auch für interne Supply Chains [z. B. 10, 11]. In der Forschung behandelt werden unter anderem auch die verteilte Simulation mit der High Level Architecture (HLA) über Unternehmensgrenzen hinweg [12]. Ein besonders wichtiges Thema ist derzeit die strukturierte und bedarfsgerechte Ableitung von Simulationsmodellen aus Geschäftsprozessmodellen und deren integrative Weiternutzung bis hin zur Implementierung der Lösung [13]. Eine simulative Betrachtung von

Nachhaltigkeitsaspekten, d. h. eine über die rein technisch-ökonomischen Ziele hinausgehende, umfassende Untersuchung von Wertschöpfungsnetzen hinsichtlich ökonomischer, sozialer und ökologischer Konsequenzen, lässt sich derzeit bei keinem der angeführten Autoren finden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine große Vielfalt von erfolgreichen Simulationsanwendungen existiert, die jedoch im Sinne der Nachhaltigkeit untereinander stärker zu integrieren sowie für eine durchgängige Betrachtung der Nachhaltigkeit zu erweitern sind.

### **3 Konzeptioneller Rahmen einer Simulation von Nachhaltigkeitsaspekten in Wertschöpfungsnetzen**

Die Herausforderungen, um einen Rahmen für die existierenden Simulationsansätze zu schaffen und diesen bzgl. Nachhaltigkeit auf Wirkzusammenhänge zu untersuchen, sehen die Autoren darin,

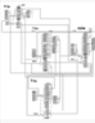
1. den Langfristcharakter der Nachhaltigkeit bei gleichzeitig relativ kurzfristigen industriellen Fragestellungen zu berücksichtigen, und dabei auch
2. die Auswirkungen von begrenzten industriellen Problemstellungen auf die anderen Aspekte der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie, Soziales) zu bewerten.

Um Auswirkungen und mögliche Lösungsansätze zu strukturieren, kann das Cross-organisational Business Process Framework eine Hilfe bieten. Dieses Framework wurde ursprünglich für die Unterstützung der Modellierung unternehmensübergreifender Prozesse entwickelt [14]. Für die Strukturierung der Simulation von Nachhaltigkeitsaspekten ist insbesondere dessen Unterteilung der Modellierungsebenen in Unternehmens-, Technik- und Ausführungsebene basierend auf den Erfordernissen für unterschiedliche involvierte Interessengruppen hilfreich.

Ähnlich wie beim Zusammenwirken mehrerer Unternehmen müssen auch bei der Bewältigung der Herausforderungen der Simulation von Nachhaltigkeitsaspekten in Wertschöpfungsnetzen unterschiedliche Akteure und Inhalte zusammenwirken. In Bild 1 sind für jede Ebene deren Anwendungsaspekte sowie die resultierenden Konsequenzen für Geschäftsprozess- und Simulationsmodelle aufgezeigt.

Der *Unternehmensebene* (Business level) fällt eine besondere Bedeutung zu, denn in ihr muss die Frage geklärt werden, wie zusätzlich zu den ingenieurtechnisch-ökonomischen Zielen auch Nachhaltigkeitsaspekte zu betrachten sind. Bei den ökologischen Zielen wird es zu Überlappungen mit den ökonomischen Zielen kommen. Beispiele hierfür sind die CO<sub>2</sub>-Reduktion und die Erhöhung der Energieeffizienz. Solange der Gesetzgeber und der Markt Indikatoren vorgeben, ist eine Betrachtung in Simulationsmodellen ohne weiteres möglich. Bei ökologischen Zielen wie langfristiger Ressourcenverfügbarkeit, Kreislaufwirtschaft oder Bodennutzung sind Indikatoren, die in der Simulation nutzbar sind, viel schwieriger zu finden. Hinzu kommt, dass die Wirkzusammenhänge zwischen den simulierten technisch-ökonomischen Fragestellungen und den ökologischen Zielen hinsichtlich Größe und Zeit nicht unmittelbar bekannt sind. Noch gravierender ist dies bei den sozialen Zielen ausgeprägt, wie Social Responsibility (z. B. bezüglich Kinderarbeit), der Einhaltung sozialer Normen, Weiterbildung oder der Forderung nach einem stabilen und sicheren sozialen Umfeld. Aus den unterschiedlichen Zielen der Nachhaltigkeit erge-

ben sich darüber hinaus Zielkonflikte sowohl innerhalb als auch zwischen den Dimensionen ökonomisch, ökologisch und sozial. Einen Eindruck von Umfang und Kompliziertheit der Indikatoren für reale Produkte geben Finkbeiner et al. [14] am Beispiel der Mercedes-Benz S-Klasse.

	Anwendungsaspekte	Modellbelange
 <b>Unternehmens-ebene</b> (Business Level)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definieren und Bewältigen mehrerer Ziele (Ökol., Ökon., Sozial)</li> <li>• Unterschiedliche Zeithorizonte</li> </ul>	Integration verschiedener Modellwelten; Klarheit über Workflow, Informationsaustausch und Regeln von Modellen
 <b>Technische Ebene</b> (Technical Level)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umgang mit verteilten Daten und Modellen</li> <li>• Feasibility check</li> </ul>	Definition technischer Abläufe durch technische Modelle (z.B. Message transfer)
 <b>Ausführungsebene</b> (Execution Level)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesskonfiguration und -parametrisierung</li> <li>• Prozessausführung</li> </ul>	Servicedefinition, Prozessabläufe, BPEL, Ontologieimplementierung

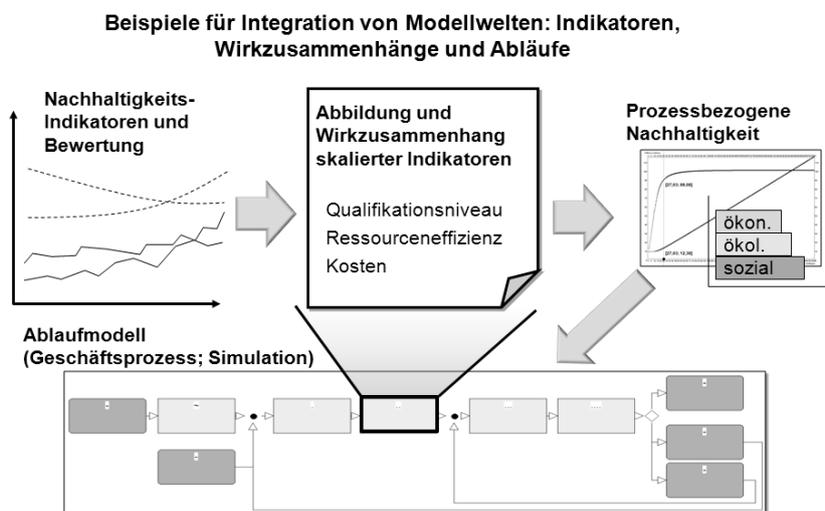
**Bild 1:** Konzeptioneller Rahmen: Anwendungs- und Modellaspekte bei der Simulation von Nachhaltigkeit

Zusammenfassend sind mess- und nachvollziehbare Indikatoren eine Grundvoraussetzung für die Simulation von Nachhaltigkeitsaspekten. Bei technisch-ökonomischen Zielen sind, wie die Erfahrung zeigt, geeignete Indikatoren verfügbar. In der ökologischen und sozialen Dimension können Standards wie ISO 14001, EMAS und SA 8000 erste Messgrößen liefern. Allerdings bilden diese Indikatoren nur einzelne Aspekte ab, nicht aber die Nachhaltigkeit einer Entscheidung als Ganzes. Die Wirkbeziehungen zwischen den Indikatoren sind nicht immer klar definiert. Darüber hinaus sind soziale und ökologische Indikatoren häufig auf relativ hohem Abstraktionsniveau und über lange Zeiträume definiert. Eine wesentliche Herausforderung besteht demnach darin, die Ziele und Indikatoren der verschiedenen Dimensionen in ihrem Wirkzusammenhang zueinander und zu einzelnen Prozessen zu beschreiben und auf das Niveau einzelner Unternehmen und Wertschöpfungsnetze zu skalieren (Bild 2).

Für das Simulationsmodell sind folglich die Modell- und Beschreibungswelten von (Nachhaltigkeits-)Indikatoren und deren Wirkzusammenhänge mit Prozessen und Ablaufmodellen (Geschäftsprozesse und Simulation) formal zu verbinden. Mit Hilfe dieses integrierten Modells lassen sich dann unternehmensinterne und -übergreifende Prozesse mit deren Ausrichtungen auf die Nachhaltigkeit klar beschreiben.

Die *Technische Ebene* des konzeptionellen Rahmens detailliert die Inhalte der Unternehmensebene auf die Sichtweise der Steuerungsprozesse inklusive der auszutauschenden Meldungen (message exchange). Diese geschieht unabhängig von konkreten Plattformen und Software. Auf dieser Ebene hat die Betrachtung der Nachhaltigkeit besonders auf den Umfang und die Herkunft der einzubindenden Daten und Modelle Einfluss. Die Tatsache,

dass im selben Simulationsmodell eine Vielzahl von Indikatoren aus allen Nachhaltigkeitsdimensionen abgebildet werden sollen, wird die zu verarbeitende Datenmenge anwachsen lassen. Dies wird verstärkt durch die Notwendigkeit, die Betrachtung nicht auf einen Produktionsstandort zu beschränken, sondern das gesamte Wertschöpfungsnetz zumindest für die Systemanalyse zu berücksichtigen. Darüber hinaus steigt auch der Aufwand bei der Erstellung des Simulationsmodells auf Grund der detailliert zu beschreibenden Wirkzusammenhänge und skalierten Indikatoren. Es erscheint daher sinnvoll, einzelne Modelle oder Modellkomponenten wiederzuverwenden, soweit sie implementiert sind. Neben der Modellierung und Simulation der Nachhaltigkeitsindikatoren im (in) Modell(en) des Wertschöpfungsnetzes selbst, sind nach Möglichkeit weitere Datenquellen einzubinden, wie übergreifende Umweltsimulationen, Datenbanken mit sozialen und ökologischen Indikatoren etc. Wenn diese Datenquellen neben den Nachhaltigkeitsindikatoren auf höherem Abstraktionsniveau auch prozessbezogene und skalierbare Beschreibungen der entsprechenden Indikatoren enthalten, könnte über eine Kopplung der Datenquellen mit den technisch-ökonomisch orientierten Simulationsmodellen eine direkte Rückmeldung der individuell ausgeprägten Nachhaltigkeitsindikatoren gewährleistet und der Umgang mit den verteilten Daten vereinfacht werden. Diese Implementierung kann unter Nutzung von Konzepten und Techniken der verteilten Simulation erfolgen. Sie stellt unter anderem auch sicher, dass der Datenaustausch zwischen den Teilkomponenten des Simulationsszenarios auf der technischen Ebene (Message Transfer) reibungslos abläuft.



**Bild 2:** Beispiele für die Integration von Modellwelten: Indikatoren, Wirkzusammenhänge und Abläufe

In der *Ausführungsebene* werden die Prozesse und Meldungen in die Modellierungssprache konkreter Systeme transformiert und ausgeführt. Die Betrachtung der Nachhaltigkeit durch die Simulationsmodelle hat kaum Einfluss auf diese Ebene des konzeptionellen Rahmens. So stellt die verteilte Simulation auf dieser Ebene beispielsweise Mechanismen

und Werkzeuge zur automatischen Parametrisierung und Konfiguration von Simulationsmodellen und weiteren Datenquellen bereit, und koordiniert deren Ausführung in einer gemeinsamen Simulationsumgebung.

Die hier skizzierten drei Ebenen des konzeptionellen Rahmens sind nicht unabhängig voneinander zu sehen. Auch wenn sich jede Ebene an unterschiedliche Entscheidungs- und Akteursebenen im Unternehmen richtet, ist ein effizientes Planungsinstrument zur Umsetzung der Maßnahmen nur erreichbar, wenn alle Akteure schlussendlich gemeinsam agieren. In diesem Sinne weist der konzeptionelle Rahmen auch darauf hin, dass Akteure bei der Modellerstellung auf dem Managementlevel, dem Entwurf und der Simulation ihrer gemeinsamen Geschäftsprozesse, der technischen Implementierung in den Workflows bis hin zur Ableitung von Modellen für die Ausführung kooperieren müssen.

Um die Simulation von Nachhaltigkeitsaspekten im industriellen Umfeld im Sinne einer interaktiven Wissensvermittlung an alle beteiligten Akteure besser unterstützen zu können sowie die Simulationstechnik gezielter weiterzuentwickeln, wird daran gearbeitet einen „Demonstrator für nachhaltige Wertschöpfungsnetze“ einzurichten [8].

## 4 Zusammenfassung

Mit dem einmütigen Beschluss der G20-Länder, die globale Erwärmung bis 2050 auf maximal 2°C zu begrenzen, wird Nachhaltigkeit zum essentiellen Thema in den Wertschöpfungsnetzen und Unternehmen werden. Um der Langfristigkeit und Vollumfänglichkeit der Nachhaltigkeit auch in der Simulation gerecht zu werden, müssen auf unterschiedlichen Ebenen weiterführende Konzepte und Werkzeuge entwickelt werden. Der beschriebene konzeptionelle Rahmen strukturiert in drei Ebenen die Auswirkungen und Konsequenzen, die die Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten in Wertschöpfungsnetzen auf die Simulationstechnik hat.

Auf der Unternehmensebene sind beispielsweise die Modell- und Beschreibungswelten von (Nachhaltigkeits-)Indikatoren sowie deren Wirkzusammenhänge mit Prozessen und Ablaufmodellen systematisch und formal zu verbinden. Auf der technischen Ebene wird das Einfließen von Nachhaltigkeitsindikatoren die Größe und Komplexität von Simulationsmodellen steigern sowie die Integration externer Datenquellen oder spezifischer Modelle erforderlich machen.

So, wie die Nachhaltigkeit nur global gesehen werden kann, so muss auch ihre Betrachtung international abgestimmt sein. Mittelfristig müssen daher Vereinheitlichungen bezüglich skalierbarer Indikatorsysteme zur einheitlichen Bewertung von Nachhaltigkeit, zur Integration von Modellwelten sowie zur standardisierten Schnittstellendefinition zwischen Simulationsmodellen und anderen Quellen erreicht werden.

## 5 Literatur

- [1] *Work Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Oxford, 1987
- [2] *Enquete-Kommission des Bundestages: Abschlußbericht der Enquete-Kommission des 13. Deutschen Bundestages*. Drucksache 13/11200, Berlin, 1998

- [3] *Seidel, E.; Clausen, J.; Seifert, E.K.*: Umweltkennzahlen. München: Verlag Vahlen, 1997
- [4] *Seuring, S.*: Zur Umsetzung von Umwelt- und Sozialstandards in der Automobilindustrie – Ergebnisse einer Umfrage. Supply Chain Management Center, Internetseite: [www.uni-oldenburg.de/scmc](http://www.uni-oldenburg.de/scmc), gelesen am 27. April 2005
- [5] *Nienhaus, J.*: Trends im Supply Chain Management. ETH Zürich, 2003
- [6] *Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.*: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008
- [7] *Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.*: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin: Springer Verlag, 2008
- [8] *Rabe, M.; Jäkel, F.-W.; Weinaug, H.*: Supply Chain Demonstrator based on Federated Models and HLA Application. In: Schulz, T.; Horton, G.; Preim B.; Schlechtweg, S. (Hrsg.) Simulation und Visualisierung 2006, Proceedings der Tagung. Ghent / Erlangen / San Diego / Delft: Society for Modeling and Simulation International SCS- European Publishing House, 2006 (S. 329-338)
- [9] *Sihn, W.; Bischoff J.; Graupner, T. D.; Özcan, A.*: Ein prototypisches Werkzeug zur Planung und simulationsgestützten Bewertung von Versorgungsketten für die Automobilindustrie. In: Simulation und Visualisierung 2003. San Diego: SCS- European Publishing House, 2003 (S. 59-67)
- [10] *Bause, F.; Buchholz, P.*: Modellierung von Supply Chains unter Berücksichtigung variierender Organisationsstrukturen. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. 2006 (S. 53-62)
- [11] *Gupta, M.; Ko, H. J.; Min, H.*: TOC based performance measures and five focus-ing steps in a job shop manufacturing environment. In: International Journal of Production Research. Band 40 (2002) 4 (S. 907-930)
- [12] *Rabe, M.; Jäkel, F.-W.*: Verteilte Simulation und Monitoring von Supply Chains. In: Weisbecker, A. ; Renner, T. ; Noll, S.: Electronic Business. Innovationen, Anwendungen und Technologien. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2004 (S.120-126)
- [13] *Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), SISO COTS Simulation Package Interoperability Product Development Group*: Standard for Commercial-off-the-shelf Simulation Package Interoperability Reference Models (SISO-STD-006-2007-DRAFT-1.0) 2007
- [14] *Greiner, U.; Jäkel, F.-W.*: Process Interoperability – From the Idea to Execution. In: Schulze, Th.; Preim, B.; Schumann, H. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2007. San Diego: SCS- European Publishing House, 2007 (S. 141-153)
- [15] *Finkbeiner, M.; Hoffmann, R.; Ruhland, K.; Liebhart, D.; Stark, B.*: Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes-Benz S-Class. In: International Journal of Life Cycle Assessment. Band 11 (2006) 4 (S. 240-246)

# Combining Neural Networks and Fuzzy Systems to improve Classification in Machine Vision

Julian Mayerhofer, Andreas Zimmermann, Michael Gyimesi  
julian.mayerhofer@gmx.net

Technische Universität Wien / Institut für Analysis und Scientific Computing  
Wiedner Hauptstraße 8–10 / 1040 Wien

## Abstract

In many applications of machine vision parts-based representations are a self-evident way for describing inhomogenous structures. These representations result in sets containing a varying number of feature vectors, which have to be aggregated to a fixed length representation to apply standard classification methods. Problems of trainable aggregation with RNNs for sets of feature vectors with different size are discussed. An alternative method based on fuzzy methods and the Ordered Weight Averaging aggregation operator is taken into consideration.

## 1 Introduction

From a real world problem in machine vision/ defect detection we came to the following task: Sets of feature vectors

$$X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_i}\} \text{ with } x_j \in \mathbb{R}^k$$

with varying cardinality  $n_i$  should lead to a binary classification results (good/bad). The varying size of the sets is due to the different number of detected objects (faults) on the subject of investigation. One feature vector contains the  $k$ -dimensional description of one object. Similar parts-based representations can be found in many other image processing applications like object recognition or biological imaging.

We are searching for a method to aggregate a set of an arbitrary number of feature vectors into a single fixed length vector, sustaining the information necessary for classification. This is necessary for employing standard classification methods, e.g. neural networks.

## 2 Related Approaches and Outlook

A trivial method of aggregation would be stacking up the feature vectors of one set, and augmenting all vectors to the same vectorsize. This stacked up vectors can then be classified by a feed forward neural net. Major drawbacks of this form of aggregation are the unnecessarily large input space, and that the structure of the data is not taken into account.

A more advanced approach is using Recurrent Neural Networks (RNNs), which are commonly used

in time-series and sequence prediction/classification. The  $n_i$  feature vectors of the set  $X_i$  are fed into the input one by one. The feedback loops in RNNs make it possible to establish some sort of memory, keeping the data flow of previous inputs in the network to some degree. The aggregation of the dataset is completed after all feature vectors of one set are presented to the network. The aggregation, now available on the output layer of the recurrent part can then be classified by a subsequent feed forward part of the net.

The information of precedent inputs is decaying quite fast though, which becomes apparent with sets of more than about 10 feature vectors. This is commonly known as the vanishing gradient problem [5]. LSTM networks, which are employing 'constant error carousels' to avoid this problem can be used for bigger sets of feature vectors [6]. Another problem of the above mentioned methods is, how order invariance can be achieved, as the feature vectors of one set don't have an inherent order.

The rating criteria in surface inspection can include combinations of summation, selection and non-linear functions of the features. Examples are the total area of objects, position data, cluster formations etc. Recent works on our topic indicated, that either a selection of a subset of elements *or* non-linear operations on the elements can be learned by RNNs with high accuracy. Rating criteria of the data we deal with also contain combinations. This combination, selection *and* non-linear operations, cannot be learned adequately by common RNNs though, regardless of size and architecture. [2]

Another common aggregation approach is the use of fuzzy systems. They incorporate qualitative knowledge into data processing, and provide interpretability to system models. Also the ability of dealing with uncertainties and ambiguities make Fuzzy Systems desirable in machine vision. In our application The knowledge needed for Fuzzy Systems is at hand, so our assumption is, that a combined approach of Fuzzy Systems and Neural Networks will improve classification results and could make way to combining advantages and avoiding drawbacks of both, neural networks and Fuzzy systems.

Neural Network	Fuzzy System
Advantages	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Learning ability / Various Learning algorithms</li> <li>- No a-priori knowledge necessary</li> <li>- No mathematical model necessary</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A-priori knowledge applicable</li> <li>- Easy interpretation and implementation</li> <li>- No mathematical model necessary</li> </ul>
Disadvantages	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Black-Box behaviour</li> <li>- No rules extractable</li> <li>- No a-priori knowledge applicable</li> <li>- The learning algorithm does not always converge</li> <li>- Heuristic determination of netparameters</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Knowledge of rules must be available</li> <li>- No learning ability</li> <li>- No formal methods for improvement of the system</li> </ul>

Table 1: Comparison of Neural Networks and Fuzzy Systems

### 3 Fuzzy Aggregation Methods

There are different fuzzy aggregation operators that represent different quantifiers. The for-all quantifier is represented by fuzzy intersection methods. The fuzzy intersection (*T-norm*) of two fuzzy sets A and B is specified in general as a function of the form

$$T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1].$$

Further a T-norm T has to satisfy the following requirements for all a,b,d in [0, 1]:

1. Boundary Condition:  $T(a, 1) = a$
2. Monotonicity:  $b \leq d \Rightarrow T(a, b) \leq T(a, d)$
3. Commutativity:  $T(a, b) = T(b, a)$
4. Associativity:  $T(a, T(b, d)) = T(T(a, b), d)$

The most common examples for T-norms are the minimum function  $T(a, b) = \min(a, b)$  and the algebraic product:  $T(a, b) = a \cdot b$ .

The existential quantifier is represented by fuzzy union methods (T-conorm). The T-conorm

$$\perp : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1].$$

has the same requirements as the T-norms except of the first one. This changes for T-conorms to

1. Boundary Condition:  $\perp(a, 0) = a$

Here the most common examples are the maximum function  $\perp(a, b) = \max(a, b)$  and the algebraic sum  $\perp(a, b) = a + b - ab$ .

In human language we use many additional quantifiers such as 'almost all', 'few', 'most', etc. We use terms that lie in between 'for all' and 'there exists'. To make modeling of these in-betweens easier, R.R. Yager [9] introduced the Ordered Weighted Averaging (OWA) aggregation operator. OWA operators are defined as following: A function  $F : [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$  is called an OWA operator of dimension  $n$ , if associated with  $F$  is a weighting vector  $W$ ,

$$W = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix}$$

such that

1.  $W_i \in [0, 1], \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$
2.  $\sum_{i=1}^n W_i = 1$

and where  $F(a_1, a_2, \dots, a_n) = W_1 b_1 + W_2 b_2 + \dots + W_n b_n$  where  $b_i$  is the  $i^{th}$  largest element in  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . By adjusting the weights the OWA operator can move from the  $\min$  operator to the  $\max$  operator. The following relation between the OWA operator and  $\min/\max$  can be obtained:  $\min(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq F(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq \max(a_1, a_2, \dots, a_n)$  [10]. Therefore the OWA operator is a flexible tool for modelling compromises between the fuzzy intersection operators and the fuzzy union operators.

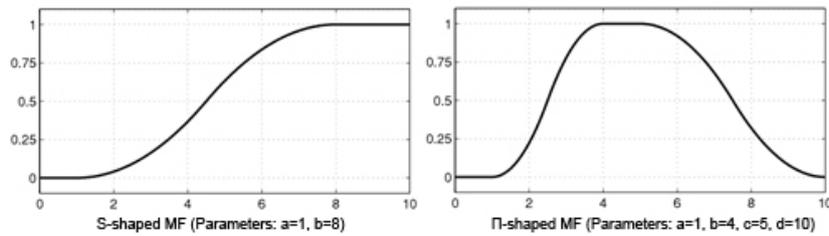


Figure 1: Membership functions for Fuzzification

## 4 Fuzzy-Neuro Approach

The approach to our classification problem is now to build a system that is a combination of a fuzzy system and a neural network [1]. The aggregation of the data is done by the fuzzy system and then the neural network assumes the classification of the aggregated data. A schema of this approach can be seen in figure 2.

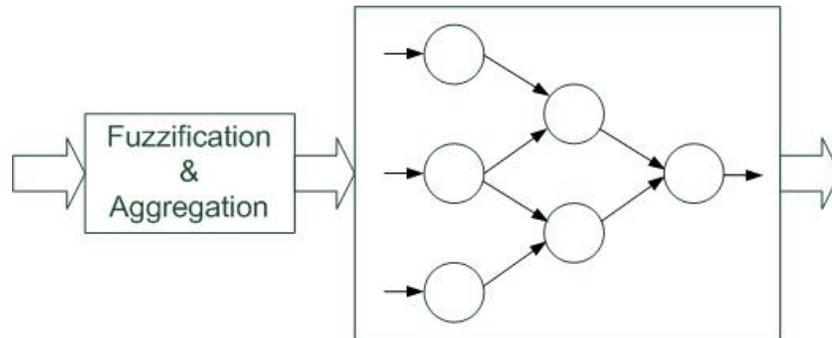


Figure 2: Schema of the Fuzzy-Neuro Classification System

The 'aggregator' consists of two layers. The first one is responsible for the fuzzification of the data and the second one actually does the aggregation. For the fuzzification the input data is applied to fuzzy membership functions that were determined in respect of the requirements of the classification issue. Depending on the rules, in which the features were involved, they are either *S*-shaped or *-*-shaped. This fuzzification also normalizes the data. Examples for these two types of fuzzy membership functions can be seen in figure 1.

### Classification Methods

For the classification part we used a feed forward network with two hidden layers, the first hidden layer with 10 neurons, the second with 5. The network was trained with a backpropagation algorithm.

## 5 Tests and Results

For our experiments we chose three different data sets where each of them consists of approximately 20000 sets of feature vectors, describing one picture with up to 43 feature vectors. The entries of each feature vector are values regarding location, size and quality of the objects. The data sets differ in the rating criteria used for labeling the images as good or bad. The images of data set #1 are rated according to four rules combining the values of only one feature vector at a time. If one vector is rated bad, the whole set is rated bad. In data set #2 and #3 rating criteria are employed, which combine the features of several feature vectors. In data set #2, these combinations are quite simple, in set #3 they are more complicated. A list of the criteria that are used for labeling in the different data sets can be seen in table 2.

To find a fitting fuzzy aggregation function for each data set, different functions were tested for their classification performance. For this purpose the aggregated data sets were divided into two parts. A training set, consisting of approximately 1000 images and a test set consisting of the remaining data. The neural network was then trained with the training data. Finally the test data was delivered to the

	Image Data Set #1	Image Data Set #2	Image Data Set #3
position and size	✓	✓	✓
scalar quality values	✓	✓	
number of pictures		✓	
number in region		✓	✓
cluster formations			✓

Table 2: Classification criterias for the Data Sets

trained network and the number of misclassified images was logged. The results can be seen in Table 3.

To determine the best weighting vector for the OWA operator a large amount of different weighting vectors were created and the one with the best classification result was chosen for further investigations. In our tests each feature of the data sets was weighted with the same feature vector. For even better classification results different weighting vectors for each feature could be determined. The best weighting vectors for each data set were found to be the following:

$$\begin{aligned}
 \text{Image Data Set \#1 : } W_1 &= \begin{pmatrix} 0.1104 \\ 0.1409 \\ 0.1631 \\ 0.1713 \\ 0.1631 \\ 0.1409 \\ 0.1104 \end{pmatrix} & \text{Image Data Set \#2 : } W_2 &= \begin{pmatrix} 0.4990 \\ 0.3526 \\ 0.1244 \\ 0.0219 \\ 0.0019 \\ 0.0001 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 & & \text{Image Data Set \#3 : } W_3 &= \begin{pmatrix} 0.1455 \\ 0.1685 \\ 0.1769 \\ 0.1685 \\ 0.1455 \\ 0.1140 \\ 0.0810 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

	Image Data Set #1		Image Data Set #2		Image Data Set #3	
Training Set	1082 images		1161 images		1160 images	
Test Set	18865 images		18768 images		18547 images	
agg.	Errors	Error rate	Errors	Error rate	Errors	Error rate
max	4506	23.88%	2407	12.82%	2641	14.24%
min	5099	27.02%	4174	22.24%	3771	20.33%
mean	5372	28.47%	2746	14.63%	2317	12.49%
OWA	3540	18.76%	2065	11.00%	2519	13.58%

Table 3: Error Rates of the Classification for the Data Sets

## 6 Discussion and Outline

An interesting finding is, that with data sets #2 and #3 the OWA-aggregation had simliar results as the *max*-aggregation. For the third data set the aggregation with the mean method seems to deliver the

best result. As most striking we found, that our classification method performed significantly better on data sets #2 and #3, where the rating criteria are more complicated. With RNN-aggregation this would be exactly the other way round, because their performance gets worse with combinations as already mentioned [2]. It seems very possible, that this problem of RNNs can be overcome with the help of fuzzy methods. To reassure this, more tests and better analysis of the data will be necessary. For now it could as well be, that our findings are artefacts of not considered properties of the data used.

To improve the classification results it would be adjuvant to determine the weights of the OWA operator in a more efficient way. It is obvious that some kind of learning mechanism for these weights could be used. Also the application of a tuning procedure of the employed membership function could lead to better results.

## 7 Literature

- [1] *Borgelt C., Klawonn F., Kruse R., Nauck D.:* Neuro-Fuzzy-Systeme, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, 3rd edition, 2003.
- [2] *Heidl W., Eitzinger C., Gyimesi M., Breitenecker F.:* Learning over Sets with Hybrid Recurrent Neural Networks: An empirical Categorization of Aggregation Functions, MathMod Vienna 2009, p.1722
- [3] *Seichter S.:* Model-based Learning Classifiers for Surface Inspection Problems, Diploma thesis (Supervisor: F. Breitenecker), Institut für Analysis und Scientific Computing 2006.
- [4] *Hochreiter S.,* Recurrent neural net learning and vanishing gradient, International Journal Of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 6(2): 107-116, 1998
- [5] *Hochreiter S., Schmidhuber J.:* Long short-term memory, Neural computation, 9(8):1735-1780, 1997
- [6] *Klir G.J., Bo Yuan:* Fuzzy Sets and Fuzzy Logic - Theory and Applications, Prentice Hall P T R, New Jersey, 1995
- [7] *Abe S.:* Pattern Classification - Neuro-fuzzy Methods and Their Comparison, Springer-Verlag London Limited, 2001
- [8] *Yager, R.R.:* On mean type aggregation. IEEE transaction on systems, man and cybernetics - part B: Cybernetics, vol. 26, pp. 209-221, 1996
- [9] *Yager, R.R.:* On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. IEEE transaction on systems, man and cybernetics, vol. 18, pp. 183-190, 1988
- [10] *Jun L., Butler-Purry K., Brenner C., Russel B.D., Langari R.:* Selecting a Fuzzy Aggregation Operator for the Multi-Criteria Fault Location Problem. Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES. vol. 3, pp. 1476- 1482
- [11] *Kushki A., Androustos P., Plataniotis K.N., Venetsanopolous A.N.:* Fuzzy Aggregation of Image Features in Content-Based Image Retrieval. Proceedings International Conference on Image Processing, vol. 3, pp. 909- 912, 2002

# Fehlerinjektion in SystemC-Simulationen für digitale Hardware

Silvio Misera and Heinrich Theodor Vierhaus  
misersil@tu-cottbus.de; htv@informatik.tu-cottbus.de  
Institut für Informatik / BTU Cottbus / Lehrstuhl Technische Informatik  
Lehrstuhl für Technische Informatik PSF 101344 03013 Cottbus

## Kurzfassung

Beim Entwurf elektronischer Systeme hat SystemC zur Beschreibung in den letzten Jahren einen festen Platz gefunden. Ein wesentlicher Vorteil eines Modells in SystemC ist die bereits gegebene Möglichkeit einer Simulation. Neben der üblichen funktionalen Simulation zur Validierung des Entwurfs ergeben sich für eine Simulation mit eingebauten Fehlern zusätzliche Herausforderungen. In diesem Beitrag werden diverse Techniken zur Fehlerinjektion in SystemC vorgestellt. Einige vergleichende Experimente helfen, diese Techniken zu bewerten. Anschließend werden generische Modellierungen von Fehlerinjektionskomponenten vorgestellt, die den Entwurfsprozess vereinfachen ohne Abstriche in der Performanz der Simulation. Mit den vorgeschlagenen Methoden eröffnet sich hiermit die Möglichkeit einer genauen Untersuchung zur Auswirkung von Hardwarefehlern in digitalen Schaltungen mit Hilfe von SystemC.

## 1 Einleitung

Elektronische Schaltungen benötigen Testprozeduren mit effizienten Strategien, die eine hohe Fehlerüberdeckung liefern. Hierfür ist die Simulation von Fehlern ein wertvolles Mittel, um solche Testprozeduren zu erstellen. Dabei gibt es für die Fehlersimulation mehrere Gründe. Zum einen dient sie der Validierung von Testmustern zur Aufdeckung von Fabrikationsfehlern. Ein häufiges Ziel ist es hierbei, mit wenigen Mustern möglichst viele Fehler aufzudecken. Zum anderen unterstützt die Simulation die Systembeobachtung im Falle eines Fehlerauftretens im laufenden Betrieb. Diese wird üblicherweise auch als simulierte Fehlerinjektion (engl. fault injection) bezeichnet. Das Ziel einer solchen Simulation kann der Untersuchung der allgemeinen Robustheit eines Systems oder der Überprüfung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Erhöhung der Fehlertoleranz sein.

Der komplexe Entwurf findet heute nach der Spezifikation üblicherweise auf der Systemebene statt. Zur Beschreibung und Modellierung hat sich hier SystemC [1] als ein De-facto-Standard innerhalb des letzten Jahrzehnts etabliert. Mit SystemC – einer C++-Klassenbibliothek – lassen sich in C++-Modellen auch hardwaretypische Eigenschaften wie z. B. Nebenläufigkeit, Kommunikation, Reaktivität oder Timing modellieren. Ein weiterer Vorteil ist der vorhandene Simulationskernel. So lässt sich ein Modell kompilieren und als Programm ähnlich einer Compiled-code-Simulation sehr schnell ausführen.

In diesem Beitrag werden diverse Techniken zur Fehlerinjektion in SystemC präsentiert, wie sie zum Teil schon in ähnlich in anderen Hardwarebeschreibungssprachen (VHDL, Verilog) untersucht wurden. Zum Teil werden aber auch neue Ansätze vorgestellt, die von dem als Basis dienenden C++ profitieren. Anhand einiger Beispiele werden die verschiedenen Techniken hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit verglichen. Die vorgeschlagenen Methoden wurden zunächst für Untersuchungen auf den unteren Ebenen des Hardwareentwurfs entwickelt (z. B. Gatterebene). Sie lassen sich aber fast alle auch auf höheren Modellierungsebenen oder auch für andere Anwendungsgebiete einsetzen. Die simulierte Fehlerinjektion für Hardwarebeschreibungen in VHDL- und Verilog-Modellen ist ein relativ gut untersuchtes Feld. So erlaubt diese beispielsweise eine frühe Untersuchung der Fehlertoleranz. Für SystemC gibt es hierzu noch wenige Arbeiten. Jedoch gewinnen solche Fehlerinjektionen in SystemC-Beschreibungen zunehmend Interesse [5,6]. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil der Fehlerinjektion in SystemC-Beschreibungen liegt darin begründet, dass der erste Systementwurf als C++- oder SystemC-Modell häufig schon vorliegt. Im weiteren Entwurfsprozess wird die Beschreibung zunehmend verfeinert. Der Umstieg auf eine andere Modellierungssprache wie z. B. auf VHDL [8] bleibt aber erspart.

## 2 Die simulierte Fehlerinjektion

Eine simulierte Fehlerinjektion ist dadurch gekennzeichnet, dass ein bestimmter Fehler für eine gewisse Zeit an einem definierten Ort injiziert wird. Die Auswirkungen des Fehlers werden an den Ausgängen des Modells beobachtet. Ein Vergleich der Antworten mit den Werten des fehlerfreien Modells zeigt, ob dieser Fehler relevant ist. Die verwendeten Fehlermodelle sind von der Entwurfsebene abhängig. Für die unteren Hardwareentwurfsebenen sind häufig anzutreffende Fehlermodelle stuck-at-, stuck-open-, bit-flip oder Brückenfehler [2]. Für Fehlerinjektionen in Hardwarebeschreibungen haben sich quasi drei Methoden durchgesetzt, wobei die Bezeichnungen je nach Publikation manchmal differieren.

- Saboteure - im Signalweg zwischen mindestens zwei Komponenten wird eine zusätzliche Fehlerinjektionskomponente eingefügt. Der Fehler wird typischerweise über einen zusätzlichen Steuereingang ausgelöst.
- Mutanten - hier werden bisherige Komponenten gegen solche getauscht, die Erweiterungen zur Fehlerinjektion enthalten.
- Simulatorkommandos - hier wird durch Built-in-Kommandos des HDL-Simulators der Wert von Variablen und Signalen manipuliert. Mit Hilfe von Makros bzw. Skripten lässt sich eine solche Fehlersimulation gut automatisieren. Für gewöhnlich muss der Simulator Erweiterungen bezüglich der Datenmodellierung haben, da die Kommandos eine Sonderstellung einnehmen.

### 2.1 Saboteure

Saboteure werden der Originalbeschreibung hinzugefügt. Üblicherweise befinden sie sich im Signalweg von zwei oder mehr Komponenten. Über einen Kontrolleingang lässt sich die Fehlerinjektion im Saboteur steuern. Der Ablauf verläuft typischerweise so, dass

während der Simulation ein Fehler ausgelöst wird und man ihn nach einer bestimmten Zeit wieder deaktiviert. Bei den Saboteuren kann man drei Kategorien unterscheiden. Der *einfach serielle Saboteur* wird zwischen zwei Ports geschaltet. Mit ihm lassen sich alle denkbaren Fehler für eine Signalleitung injizieren. Der *komplex serielle Saboteur* wird zwischen mehreren Signalleitungen geschaltet. Mit ihm kann man z. B. auch Brückenfehler und Übersprechverhalten modellieren. Der *parallele Saboteur* wird an mindestens eine bestehende Leitung angeschlossen. Störungen mit transienten Verhalten auf Bussen lassen sich mit diesem gut provozieren.

## 2.2 Mutanten

Mutanten ändern ebenso wie die Saboteurtechnik die Schaltungsbeschreibung. Hierbei wird eine bestehende Komponente durch eine andere ersetzt. Der Austausch kann beispielsweise auf zweierlei Art erfolgen. Im einfachsten Fall wird eine korrekt arbeitende Komponente gegen die fehlerhafte mit anderer Funktionalität getauscht. Zum Beispiel kann man ein OR-Gatter durch ein NOR-Gatter ersetzen. In SystemC ist dieser Weg wenig praktikabel, da man bei der Injektion mehrerer sequentiell auftretender Fehler jedes Mal den Programmcode ändern und anschließend kompilieren müsste. Die Zeit der Simulationsvorbereitung wüchse damit erheblich.

Alternativ wird die korrekte Komponente durch ein erweitertes Modul ausgewechselt, welches die zusätzliche Eigenschaft der Fehlerinjektion bietet. Mit einem zusätzlichen Kontrolleingang kann dann der Fehlerzustand selektiv ein- und ausgeschaltet werden. Diese Technik ist sehr flexibel. Man kann mit ihr sowohl Signale als auch Variablen manipulieren. Mit Mutanten lassen sich alle Fehler modellieren, die in oder an Komponenten auftreten können.

## 2.3 Simulationskommandos

In einigen leistungsfähigen (V)HDL-Simulatoren [3,4] gibt es Schnittstellen, die es mit speziellen Simulatorkommandos gestatten, den Ablauf interaktiv zu steuern. So sind die Werte von Signalen und u. U. auch die von Variablen manipulierbar. In der SystemC-Bibliothek sind solche Kommandos nicht zu finden. Es ist zwar möglich aus der Simulationssteuerung heraus einem Signal oder einer Variablen einen Wert zuzuweisen, diese Injektion ist jedoch oft nur vorübergehend und kann beim nächsten Schreibvorgang wieder unwirksam sein. Damit ist dieser Weg ungeeignet um permanente Fehler oder Fehler bestimmter Dauer zu provozieren. Im Folgenden werden einige Methoden vorgestellt, die dieses Verhalten nachzubilden helfen. Mit den Simulatorkommandos haben sie gemeinsam, dass sie ähnlich leicht zu handhaben sind. Allerdings unterscheiden sie sich in ihrer Implementierung. Deshalb wurden sie in Anlehnung an den Simulatorkommandos als *Simulationskommandos* bezeichnet.

### 2.3.1 Simulationskommandos für Logiksignale

Für die *Logiksignale* sieht die Lösung so aus, dass in der SystemC-Bibliothek einige Klassen überschrieben wurden. Mit diesen mehrwertigen Logiksignalen lässt sich Hardwareverhalten gut simulieren. Folgende Änderungen waren dabei bedeutend:

- Der Datentyp *sc\_logic* wurde um die zusätzlichen Datenwerte ('A', 'B', 'R') erweitert.  $sc\_logic \in \{0, 1, Z, X, A, B, R\}$
- Diese Werte bekamen in der Klasse *sc\_signal\_resolved* neue Signalstärken zugewiesen. Der Wert 'A' (Above) bedeutet eine starke '1', der Wert 'B' (Below) entspricht einer starken '0' und der Wert 'R' (Release) ist ein neuer Sondertyp.
- Damit die neuen Werte auch sinnvoll ausgeführt werden können, wurden die Operatoren von  $sc\_logic \in (\&, |, ^, \sim, \text{etc.})$  überladen.
- Zusätzlich wurde die *conversion table* für eine brauchbare Typumwandlung erweitert.
- Andere Methoden (z. B. das Signal-Tracing) wurden überschrieben.

Mit den neuen Signalwerten eröffnet sich der Weg zur Injektion von Haftfehlern und durch die Implementierung einer „rotierenden“ Priorität wird eine deterministische Fehlerdauer erreicht. Das Schreiben von 'A' führt zu einem Stuck-at-1-Fehler und 'B' zu einem Stuck-at-0-Fehler. Das Anlegen eines 'R' hebt die Fehlerinjektion wieder auf. In der Tabelle 1 ist die Auflösung der Signalstärken dargestellt.

**Tabelle 1:** Auflösung der Simulationskommandos.

	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>Z</b>	<b>X</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>R</b>
<b>0</b>	0	X	0	X	B	A	0
<b>1</b>	X	1	1	X	B	A	1
<b>Z</b>	0	1	Z	X	B	A	Z
<b>X</b>	X	X	X	X	B	A	X
<b>B</b>	B	B	B	B	B	X	R
<b>A</b>	A	A	A	A	X	A	R
<b>R</b>	0	1	Z	X	R	R	R

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Werte 'A' und 'B' ein dominantes Verhalten besitzen. Jedoch ist ein 'R' stärker als 'A' und 'B'. Andererseits ist 'R' schwächer als logisch '0' und '1'. Mit diesem Trick lässt sich eine Fehlerinjektion wieder aufheben.

Das Schaltungsmodell, auch als device under test (DUT) bezeichnet, bleibt für die Fehlerinjektion unverändert. Die Aktivierung wurde so verwirklicht, dass bei der automatisierten Simulationsvorbereitung in der Testbench, so bezeichnet man die Simulationsumgebung um das DUT, eine Simulationssteuerung eingebaut wird.

Um während der Simulation Fehler aktivieren zu können und sie auch wieder aufzulösen, wurde in der *main*-Datei eine Simulationssteuerung implementiert. Diese ersetzt die Standardanweisung *sc\_start(..)* durch die Befehle *sc\_initialize()*, *sc\_cycle()* und führt zu einer direkten Beeinflussung des Simulationstaktes. Eine Fehlerinjektion kann zwischen *sc\_cycle()*-Anweisungen ihren Platz finden. Für einen Stuck-at-1-Fehler kann der Befehl beispielsweise wie folgt aussehen:

```
Mod1.SubModA.Sig1.write(sc_logic_A).
```

### 2.3.2 Simulationskommandos für Variablen

Die Injektion von permanenten Fehlern bzw. solcher mit deterministischer Zeitlänge in Variablen ist in SystemC problematisch. Eine Umsetzung der Technik, wie sie für die Logiksignale vorgeschlagen wurde, ist ebenso schwierig. Einerseits ist der Wertebereich einer Variablen für gewöhnlich weitaus größer bzw. ausgeschöpft und andererseits erlaubt C++ keinen Eingriff in seine proprietären Datentypen. Zur Problemlösung wurde hierfür ein neuer Datentyp erstellt. Der neue Datentyp verhält sich so, dass er in Abhängigkeit des Zugriffs-Flags *lock* einen Schreibvorgang erlaubt oder unterbindet. Die Abbildung 1 zeigt einen Teil der Klasse *MyInteger* welche den Integer-Datentyp ersetzt.

---

```
2   class MyInteger {
3       private:
4           int data;
5           bool lock;
6       public:
7           MyInt (int dat_=0) {
8               this->data = data_;
9               lock = false;
10          }
11          . . .
12          inline MyInt operator &=
13              ( const MyInt& b ) {
14              if (!lock)
15                  this->data = data & b.data;
16              return this->data;
17          }
18          inline bool setlock() {
19              this->lock=true;
20              return true;
21          }
22          . . .

```

---

**Abbildung 1:** Fehlerinjektionsdatentyp für Integer

Die Member-Variablen des neuen Datentyps sind hierbei *data* für die Aufnahme des Datums und *lock* für den Zugriffsschutz. Um mit diesen Datentypen brauchbar arbeiten zu können, wurden alle nötigen Operatoren überladen (z. B. Zeile 12-17). Ein Operator manipuliert dabei nur die *data*-Variable. So verhält sich eine *MyInteger*-Variable funktional nach außen wie ein normaler Integer-Typ. Für den Zugriff auf das *lock*-Flag wurden separate Methoden erstellt (z. B. Zeile 18-20). Ein definierter Fehlerwert wird so gesetzt, dass man beispielsweise zunächst den fehlerhaften Wert schreibt und anschließend die Variable mit *setlock()* sperrt. Für ein detaillierteres Modell, z. B. dem eines Registers, kann es nötig sein, nur einzelne Bitstellen auszuwählen. Hierzu wird die vorgestellte Klasse zur Bit-Selektion um eine Masken-Member-Variable erweitert. Weitere Methoden wie z. B. *sc\_trace()*, die das Debuggen mittels einer Signalkurvendatei erleichtert, werden hier ebenso implementiert.

Für ein fertiges Fehlerinjektionsprojekt muss dann lediglich in der Hardwarebeschreibung der bestehende Datentyp durch den erweiterten Typ ersetzt werden. Durch den Einsatz von Perl-Skripten wurde dieser Arbeitsgang automatisiert. Die Einführung der Simulationskommandos für Variablen erlaubt eine präzise und erweiterte Fehlerinjektion.

## 2.4 Vergleich der Simulationstechniken

Anhand einiger Beispielschaltungen wurde die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Techniken untersucht. Dabei zeigt sich, dass die neue Technik der Simulationskommandos (Tabelle 2) bis zu einem Faktor von knapp 2 schneller ist als die vorherigen, aus anderen HDLs bekannten Techniken von Saboteuren und Mutanten.

**Tabelle 2:** Simulationsvergleich verschiedener Fehlerinjektionen.

Technik	Zeit (normiert)		
	K1	K2	K3
Simulationskommandos	1.00	1,00	1.00
Mutanten mit Kommandos	1.01	1,01	1.23
Mutanten	1.05	1,36	1.96
Saboteure mit Kommandos	1.28	1,32	1.81
Saboteure	1.30	1,40	1.84
FIT (VHDL Fault Injection Tool)	3.71	3,14	5.21

Eine schnellere Ausführung der Modellierungen mit Saboteuren und Mutanten erreicht man, wenn man sie mit den Simulationskommandos kombiniert. Dabei wird statt des zusätzlichen Steuereingangs ein Simulationskommando verwendet. In der letzten Zeile sind Ergebnisse mit FIT dargestellt, einem Fehlerinjektionsprogramm für VHDL-Beschreibungen [14]. K1 ist die kleinste und K3 die größte Schaltung.

In [5] wird eine ähnliche Technik wie die der Simulationskommandos in Variablen vorgestellt und vorgeschlagen diese auch für Signale zu nutzen. Das ist natürlich ebenso mit der hier vorgestellten Methode möglich. Jedoch ist dort der Overhead für die Simulation erheblich größer als bei der hier vorgestellten Injektion in Signalen mit Kommandos.

## 3 Parametrisierbare Injektionskomponenten

Komponenten die generische Parameter verwenden, sind in VHDL häufig in Gebrauch. In C++ und somit auch in SystemC ist eine generische Programmierung ebenfalls möglich. Die Entwicklung von Modulen kann mit viel Aufwand verbunden sein. Mit parametrisierbaren Modulen kann der Aufwand aber verringert werden. Eine Parametrisierung kann die Struktur, Werte oder Attribute betreffen. In SystemC kann im Gegensatz zu anderen HDLs sogar der Typ parametrisiert werden. Die Auflösung der Parametrisierung kann zu unterschiedlichen Zeiten erfolgen. Interessant ist hierbei die Auflösung während der Kompilierzeit (mit Hilfe von Templates) und die Auflösung während der Elaborationsphase (mittels Konstruktorargumente). Während die Verwendung von

Templates eine sehr flexible Lösung darstellt, hat die Verwendung von Konstruktorargumenten den Vorteil, dass zur Simulation kein Originalcode vorhanden sein muss. Damit haben IP-Anbieter (intellectual property) die Möglichkeit ihre Komponenten weitergeben zu können und gleichzeitig ihr Know-how zu schützen. Die Abbildung 2 zeigt einen Teil einer Template-Umsetzung für einen AND-Mutant. Parametrisiert wird dabei die Anzahl der Eingänge.

```

. . .
template <int size = 2>
SC_MODULE(and) {
    sc_in<sc_logic> a[size];
    . . .
    SC_HAS_PROCESS(and);
    and(sc_module_name name_) :
        sc_module(name_) {
            SC_METHOD(doit);
            for (int i=0; i < size; i++)
                sensitive << a[i];
            . . .
        }
    template <int size>
    void and<size>::doit() {
        . . .
        switch (v_fi) {
        case 0: while (i<size) {
                zt = zt & a[i].read();
                ++i;
            }
            z0.write(zt);
            break;
        case 1: z0.write(sc_logic_0);
            break; //sa0
        }
    }
. . .

```

**Abbildung 2:** Template-Mutant für ein AND-Modul in SystemC

In dieser Arbeit wurde Parametrisierung für Saboteure und Mutanten implementiert und näher untersucht.

**Tabelle 3:** Simulationsergebnisse für (nicht-)parametrisierte Beispiele.

Design	Speed-up					
	normales Modul		Template-Modul		Konstruktor-Modul	
	mit Aus- gabe	ohne Ausgabe	mit Aus- gabe	ohne Ausgabe	mit Aus- gabe	Ohne Ausgabe
decod	1,0	1,0	0,99	1,01	1,01	1,01
fsm6	1,0	1,0	1,001	1,057	1,036	1,117
c17	1,0	1,0	1,00	0,973	1,01	1,0

In der Tabelle 3 sind Ergebnisse gemessen als Beschleunigung von drei Schaltungen für Mutanten aufgeführt. Für die parametrisierten Module ergeben sich keine Nachteile. Mitunter sind sie sogar etwas schneller, was für eine gute Arbeit des Compilers spricht.

## 4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass Fehlerinjektionstechniken, wie sie in anderen HDLs schon erfolgreich verwendet wurden, auch in SystemC möglich sind. Es wurde auch gezeigt, dass Fehlerinjektionen für die es kein SystemC-Äquivalent gibt, durch Erweiterungen der SystemC-Bibliothek u. ä. nachbildbar sind. Die neuen Implementierungen überzeugen durch eine höhere Simulationsgeschwindigkeit. Des Weiteren wurde die Möglichkeit der generischen Modelle für Injektionsmodule untersucht. Die guten Ausführungszeiten dieser Module sprechen neben derer Praktikabilität für ihren Einsatz.

## 5 Literatur

- [1] SystemC: [www.systemc.org](http://www.systemc.org), 1.07.2009.
- [2] Silvio Misera: Simulation von Fehlern in digitalen Schaltungen mit SystemC, Dissertation BTU Cottbus, 2008.
- [3] Mentor Graphics Inc.: Modelsim, [www.modelsim.com](http://www.modelsim.com), 05.02.2007.
- [4] Aldec Inc.: Active-HDL und Riveria, [www.aldec.com](http://www.aldec.com), 20.07.2009.
- [5] R.A. Shafik et. al.: SystemC-Based Minimum Intrusive Fault Injection Technique with Improved Fault Representation, On-Line Testing Symposium, IOLTS '08.
- [6] C. Bolchini et. al.: Fault Models and Injection Strategies in SystemC Specifications, 11th Euromicro conference on DSD, pages 88-95, 2008.
- [7] Galke, C.; Misera, S.; Fröschke, H.; Vierhaus, H. T.: "Eine Simulationsumgebung zur Validierung des Fehlerverhaltens für Prozessor-basierte Systeme " - Poster, Proc. 17. ITG-GI-GMM-Workshop "Test und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen", Innsbruck, 2005.
- [8] IEEE Package 1164: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/standards.jsp>, 08.08.2009.

# Modellbildung und Simulation von Mehrzonenöfen zur Einkristallzüchtung unter automatisierungstechnischen Aspekten

Dirk Bräuer  
Dirk.Braeuer@aut.tu-freiberg.de  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Freiberg  
Lessingstraße 45, 09596 Freiberg

Prof. Dr. Andreas Rehkopf  
Andreas.Rehkopf@aut.tu-freiberg.de  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Freiberg  
Lessingstraße 45, 09596 Freiberg

## Kurzfassung

Die Züchtung von hochreinen Einkristallen für die Halbleiterindustrie erfolgt zu großen Teilen in Mehrzonenrohröfen. Zwei wesentliche Methoden zur Gewinnung von Monokristallen sind das Gradient-Freeze- und das Zonenschmelzverfahren. Je nach verwendeten Materialien werden Temperaturen über 1400°C für den Prozess benötigt. Die Züchtung findet in einem Hochvakuum statt. Bereits geringe Abweichungen von einem vorgegebenen Temperaturprofil können die Struktur der wachsenden Monokristalle negativ beeinflussen und ggf. für die Weiterverarbeitung zu Wafern unbrauchbar machen. Deshalb ist eine hohe Temperaturstabilität von entscheidender Bedeutung.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Prozessmodell eines Mehrzonenofens mit Probe gezeigt, welches die in der Praxis vorherrschenden P- und V-kanonischen Modelle erweitert und somit eine exaktere Temperaturführung ermöglicht.

## 1 Prozessbeschreibung

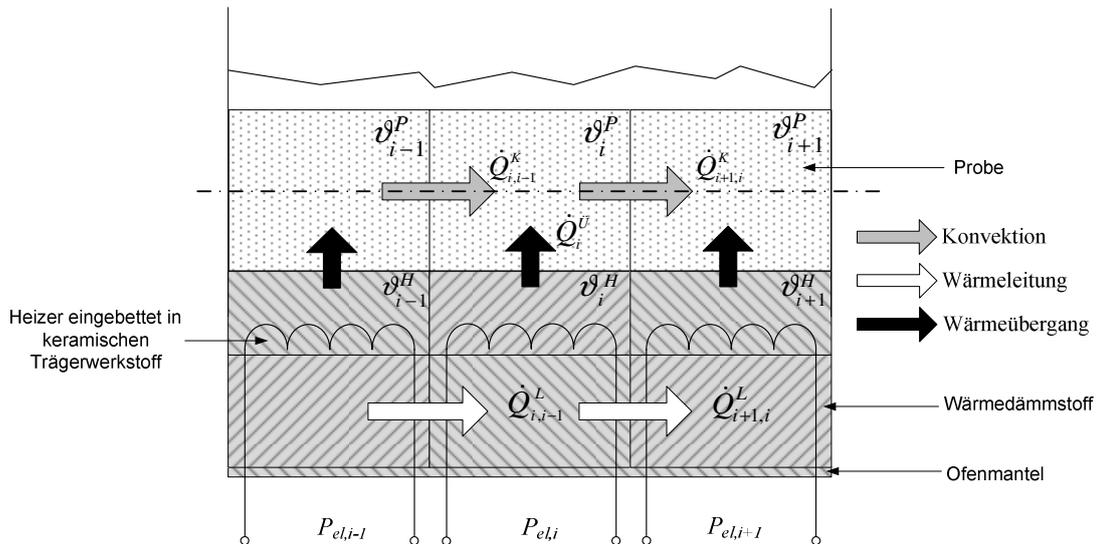
Abbildung 1 zeigt einen Mehrzonenofen mit eingeschobener Probe und die dabei auftretenden Wärmetransportvorgänge. Idealisiert wird von einem direkten Kontakt zwischen Heizzone und Kartusche ausgegangen, somit werden nur Wärmeleitung, Konvektion und Wärmeübergang betrachtet. Zusätzlich ist eine Messung der Temperatur in Probenähe möglich (siehe Kapitel 3). Zur Modellierung wird die Probe gedanklich in Teilabschnitte untergliedert, welche der Zonenanordnung entsprechen.

Ausgehend von den physikalischen Zusammenhängen wird eine Energiebilanz für die Temperatur im Probenabschnitt  $i$  sowie für die  $i$ -te Heizzone aufstellt.

$$\text{Bilanz für den Probenabschnitt:} \quad \dot{H}_i^P = \dot{Q}_{i,i-1}^K - \dot{Q}_{i+1,i}^K + \dot{Q}_i^{\dot{U}} \quad (1)$$

$$\text{Bilanz für die Heizzone :} \quad \dot{H}_i^Z = \dot{Q}_{i,i-1}^L - \dot{Q}_{i+1,i}^L + P_{el,i} \quad (2)$$

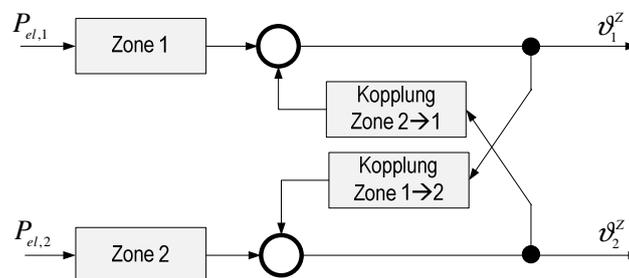
$\dot{Q}^L$  - Wärmeleitung                       $\dot{H}$  - Enthalpieänderung                       $P_{el}$  - elektrische Leistung  
 $\dot{Q}^K$  - Konvektion                               $\vartheta^Z$  - Temperatur am Heizer  
 $\dot{Q}^{\ddot{U}}$  - Wärmeübergang                       $\vartheta^P$  - Temperatur in Probennähe



**Bild 1:** Wärmetransportvorgänge innerhalb der Anlage mit Probe

## 2 Modell ohne Probe

Aus den Bilanzgleichungen (1) und (2) lässt sich das in Abbildung 2 dargestellte Prozessmodell für einen Zwei-Zonenofen ableiten, wobei zur Vereinfachung zunächst die Anlage ohne Probe betrachtet wird. Für die Haupt- und Kopplungsstrecken werden Übertragungsfunktionen mit Zeitverzögerungen angesetzt.



**Bild 2:** Prozessmodell eines Zwei-Zonenofens ohne Einbeziehung der Probe

Das Modell bietet gegenüber der P- oder V-kanonischen Struktur [1] eine bessere Approximation des realen Anlagenverhaltens.

Die Temperaturen der Zonen ergeben sich aus:

$$\begin{aligned} \vartheta_1^Z &= P_{el,1} G_{Z,1} + \vartheta_2^Z G_{K,2,1} \\ \vartheta_2^Z &= P_{el,2} G_{Z,2} + \vartheta_1^Z G_{K,1,2} \end{aligned} \quad (3)$$

wobei  $G_{Z,i}$  die Übertragungsfunktion der  $i$ -ten Zone und  $G_{K,j,i}$  die Übertragungsfunktion der Kopplung von Zone  $j$  auf Zone  $i$  darstellt. Die Kopplungen  $G_{K,j,i}$  und  $G_{K,i,j}$  werden als symmetrisch angenommen.

Zur Ermittlung der Kopplung wird die Leistung der Zone 1 konstant gehalten. Wird für die Temperatur  $\vartheta_2^Z$  ein geeignetes Signal erzeugt, so reduziert sich die Identifikationsaufgabe für die Kopplung auf:

$$\vartheta_1^Z = \vartheta_2^Z G_{K,2,1} \quad (4)$$

Durch das Hinzufügen von Entkopplungsstrukturen lassen sich daraufhin die Zonenübertragungsfunktionen ermitteln. Hierfür werden PRBS (Pseudo-Random-Binary-Signal) Verläufe gemäß [2] verwendet.

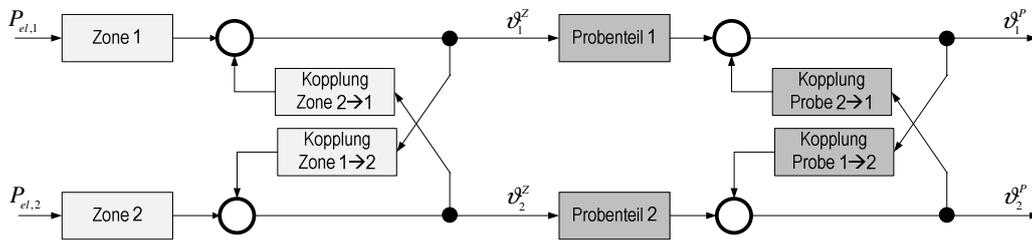
Für Anlagen mit mehr Zonen ist das Identifikationsverfahren anzupassen, da eine Zonentemperatur von beiden benachbarten Temperaturen beeinflusst wird. Die Identifikation kann in diesem Fall iterativ von den Randzonen zur Mitte durchgeführt werden.

Soll das Modell einen leeren Nutzraum abbilden, so ist zusätzlich die Wärmestrahlung in die Kopplungen einzubeziehen. Das Gesamtmodell ist durch Simulation zu überprüfen. [4]

### 3 Modell mit Probe

Im Rahmen eines begleitenden EU-DLR Forschungsprojektes zur Kristallzüchtung unter Mikrogravitationsbedingungen hat sich die zusätzliche Temperaturmessung in Probennähe als vorteilhaft erwiesen. Sie erlaubt es, Kaskaden-Reglerstrukturen aufzubauen und somit eine bessere Temperaturführung in der Schmelze zu realisieren. Abbildung 3 zeigt das Modell mit zusätzlicher Einbeziehung der Probe.

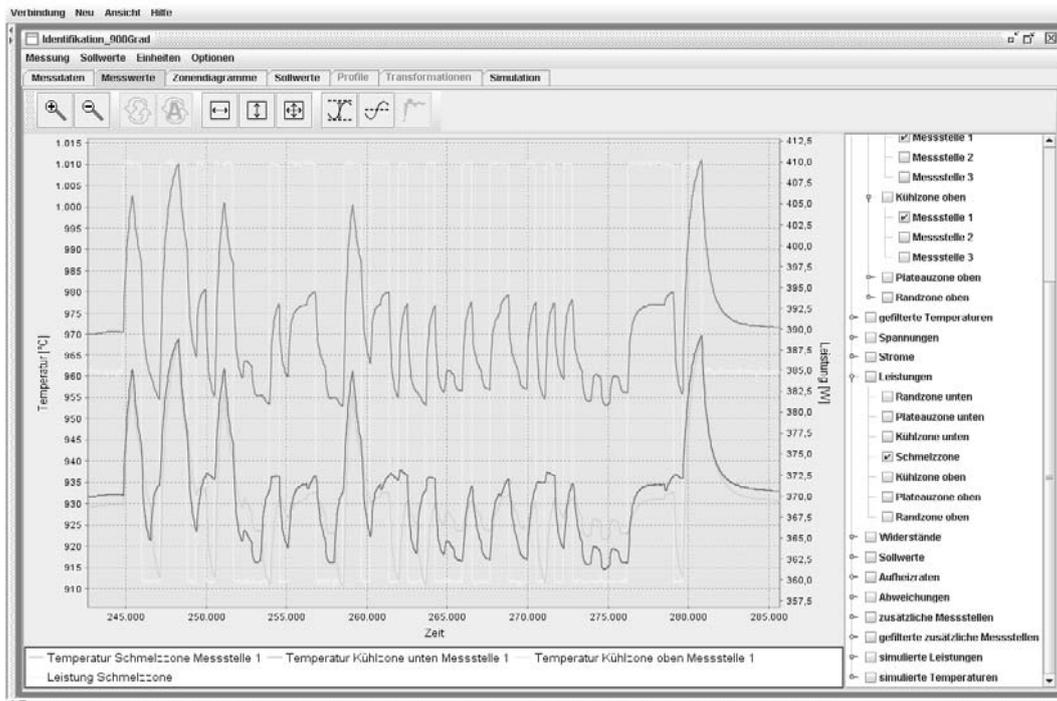
Der Wärmeaustausch innerhalb der Probenabschnitte wird analog zum Wärmeaustausch zwischen den Heizzonen betrachtet.



**Bild 3:** Prozessmodell eines Zwei-Zonenofens mit Einbeziehung der Probe

Da die Lebensdauer eines Mehrzonenofens oftmals weniger als 1000h bei Hochtemperaturen beträgt und die Herstellung der Kartuschen mit Probe zeit- und kostenintensiv ist, ist es erforderlich, die entwickelten Regler durch Simulation vor der Implementierung zu testen.

Zur Durchführung der Identifikationsläufe und zur Simulation von Modell und Regler wird das Prozessdatenmanagementsystem OMaCS [4] eingesetzt. Abbildung 4 zeigt beispielhaft eine PRBS-Folge zur Identifikation der Hauptstrecken.



**Bild 4:** Identifikationslauf einer Sieben-Zonen-Anlage in OMaCS

## 4 Literatur

- [1] *K. Hermann, A. Rehkopf, H. Sauer mann*: Betrachtungen zur Identifikation einer Gradient-Freeze-Anlage zur Einkristallzüchtung, S. 566-573. at – Automatisierungstechnik 54, 2006.
- [2] *H. Unbehauen*: Regelungstechnik III – Identifikation, Adaption, Optimierung (6.Auflage), S. 44, Vieweg Verlag 2000.
- [3] *U. Wunderwald*: Beeinflussung des Wärme- und Stofftransports bei der Vertical Gradient Freeze-Kristallzüchtung durch ein rotierendes Magnetfeld. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2006
- [4] *D. Bräuer, A. Rehkopf*: Online Management and Control System for growing of monocrystal semiconductor materials in multi-zone furnaces, Tagungsband: S. 1072-1075, IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2008, Hamburg

# Referenzmodelle in der Agenten-basierten Modellierung - Anwendung, Klassifikation, Standards

Robert Siegfried  
robert.siegfried@unibw.de  
Universität der Bundeswehr München  
Institut für Technische Informatik  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85577 Neubiberg

Bernhard Schneider  
bernhard.schneider@eads.com  
EADS Deutschland GmbH  
System Design Centre Germany  
Landshuter Straße 26  
85716 Unterschleißheim

## Kurzfassung

Neben dem obligatorischen Einsatz eines stringenten Modellbildungsprozesses können geeignete Referenzmodelle, eingesetzt als Leitlinie bzw. Leitfaden, die Modellierer und Entwickler in den verschiedensten Phasen der Erstellung eines Agenten-basierten Simulationsmodells unterstützen und die Qualitätssicherung erleichtern. In dieser Arbeit wird ein erster Ansatz zur Klassifikation von Referenzmodellen im Kontext der Agenten-basierten Modellierung vorgestellt und anhand ausgewählter Beispiele veranschaulicht. Eine derartige Klassifikation stellt den Ausgangspunkt für eine Standardisierung der Beschreibung und Dokumentation von Referenzmodellen dar.

## 1 Agenten und Referenzmodelle

Das Paradigma der Agenten-basierten Modellierung kommt in den unterschiedlichsten Fachgebieten zum Einsatz. Gerade in den Human- und Sozialwissenschaften werden Agentensysteme zunehmend genutzt um verschiedenste Fragestellungen zu untersuchen. Gemeinsamer Hintergrund ist dabei stets die Notwendigkeit, eigenständige Entitäten im Modell abzubilden, die ihre Umwelt mit Sensoren wahrnehmen und durch Effektoren beeinflussen können (vgl. [7]).

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes Agenten-basierter Modelle und deren Komplexität rückt die Modellqualität immer stärker in den Fokus. Modellqualität soll hierbei ganzheitlich verstanden werden und alle relevanten Aspekte (u.a. Validität, Erweiterbarkeit und Dokumentation) beinhalten. Neben dem obligatorischen Einsatz eines stringenten Modellbildungsprozesses, welcher auch die Dokumentation der erstellten Artefakte und Modelle klar definiert, können geeignete Referenzmodelle, eingesetzt als Leitlinie bzw. Leitfaden, Modellierern und Entwicklern in den verschiedensten Phasen des Modellbildungsprozesses die Qualitätssicherung erleichtern (vgl. [14], [2], [6]).

Allgemein wird ein Referenzmodell aufgefasst als unabhängiges Methodologie-basiertes Konstruktionsschema, welches Standardlösungen für Modellierungsprobleme bereitstellt und Vorlagencharakter für eine bestimmte Klasse realer Systeme mit gemeinsamer Tiefenstruktur aufweist (vgl. [8]). Die Kapazität eines Referenzmodells ist abhängig von der durch das Referenzmodell handhabbaren Problemgröße und damit vom Freiheitsgrad, den ein Referenzmodell für seine Anpassung an bestimmte Probleme durch den Modellierer bzw. Entwickler zulässt.

Hauptziele für den Einsatz von Referenzmodellen sind zum einen die Reduktion der Komplexität der Modellierungsaufgabe und damit auch die Erleichterung der Modellie-

rung sowie zum anderen die Reduktion des Aufwands im Sinne von Zeit- und Kosteneffizienz bei der Erstellung von Simulationsmodellen. Des Weiteren schaffen Referenzmodelle ein gemeinsames Verständnis hinsichtlich Begrifflichkeiten, Konzepten, Abläufen, oder auch der Semantik der zu beschreibenden Systeme und steigern hierüber die Vergleichbarkeit von Modellen untereinander.

## **2 Verwendung von Referenzmodellen: Aktueller Stand, Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten**

Aufbauend auf der Identifikation des Modellierungsproblems sollte im Modellbildungsprozess idealerweise die Auswahl eines geeigneten Referenzmodells zur Unterstützung des Modellierungsvorhabens und auch des Aufbaus eines Simulationsmodells erfolgen. Gerade an dieser Stelle ergeben sich mehrere Unwegsamkeiten, beginnend bei den oft ungenauen Beschreibungen von Referenzmodellen, die für die jeweilige Problemklasse verfügbar sind. Zudem sind die Anwendungsgebiete und -voraussetzungen sowie Leistungsgrenzen oftmals nicht ausreichend dokumentiert. Unter der Annahme, dass die Verifikation, Validierung und Akkreditierung (VV&A) von Referenzmodellen mindestens genauso wichtig ist wie für ein konkretes problemspezifisches Modell, ist diese Nichtverfügbarkeit von ausreichender Dokumentation äußerst kritisch zu beurteilen. Nicht zuletzt sei erwähnt, dass Referenzmodelle für bestimmte Problemklassen schwer auffindbar sind und frei verfügbare Anwendungsbeispiele oftmals nicht existieren.

Im Bereich der Multi-Agenten-Systeme existieren mit den FIPA-Standards (vgl. u.a. [3]) sowie dem Agent Systems Reference Model (ASRM) [1] vergleichbare Ansätze, welche auf abstrakter, d.h. problemunabhängiger, Ebene, architekturbezogene Vorgaben für ein derartiges System aufzeigen. Die zuvor angeführten Probleme, insbesondere nur unscharf definierte Problemklassen oder Anwendungsvoraussetzungen treffen jedoch im gleichen Maße auch auf diese Referenzmodelle zu. Ebenso finden sich, trotz einem vermeintlich hohen Bekanntheitsgrad nur sehr wenige Beispiele für konkrete Anwendungen. Während viele Frameworks für Multi-Agenten-Systeme zumindest Teile der FIPA-Standards implementieren und bereitstellen, sind keine Informationen über konkrete ganzheitliche Anwendungen des ASRM bekannt. Folglich ist eine Evaluation dieser Referenzmodelle mangels allgemein verfügbarer Erfahrungsberichte nur sehr schwer möglich.

Zur Behandlung der genannten Probleme außerhalb der oft schwierigen Erfassung und Beschreibung des durch die Anwendung eines Referenzmodells zu lösenden Problems sind verschiedene, auch kombinierbare Lösungsmöglichkeiten denkbar. Einen ersten Schritt kann eine allgemeine Klassifikation bestehender Referenzmodelle darstellen. Eben diesem Aspekt widmet sich die in diesem Artikel vorgestellte Forschungsarbeit.

## **3 Klassifikation von Referenzmodellen: Dimensionen**

Für die Klassifikation von Referenzmodellen haben wir die folgenden drei Dimensionen identifiziert, welche sehr charakteristisch sind und eine hohe Trennschärfe aufweisen:

- Modellierungsebene (konzeptuelles, formales oder ausführbares Modell)
- Modellierungsaspekt (Struktur, Verhalten)
- Domänencharakteristik (domänenunabhängig, domänenspezifisch)

Während bei der Entwicklung eines konkreten Simulationsmodells üblicherweise alle Modellierungsebenen und -aspekte zu betrachten sind, können Referenzmodelle sich explizit auf bestimmte Modellierungsebenen oder -aspekte einschränken. Die Modellierungsebene beschreibt im weiteren Sinne den Detailgrad mit dem ein bestimmtes Modell beschrieben wird (vgl. [6]) Aufbauend auf die konzeptuelle (oftmals umgangssprachliche oder semi-formale) Modellbeschreibung erfolgt durch die Formalisierung eine deutliche Verfeinerung des Modells. Das ausführbare Modell stellt in diesem Kontext die detaillierteste Spezifikation eines Modells dar.

Grundsätzlich können Referenzmodelle den Modellbildungsprozess auf allen drei Modellierungsebenen unterstützen. Auf der Ebene des konzeptuellen Modells kann der Modellbildungsprozess durch Vorgaben hinsichtlich der Struktur- und Verhaltensbeschreibung des zu erstellenden Simulationsmodells unterstützt werden. Insbesondere sollte auch der wichtige und kritische Aspekt der möglichst optimalen Aufteilung des Modells (in Teilmodelle bzw. Komponenten) durch ein Referenzmodell aufgegriffen werden. Auf der Ebene des formalen Modells können Referenzmodelle Beiträge hinsichtlich einer geeigneten Formalisierung liefern. Sofern möglich oder sinnvoll, können Referenzmodelle an dieser Stelle eine Formalisierungsmethode vorschlagen oder auch einen Großteil der formalen Spezifikation vorwegnehmen, sodass für das jeweilige problemspezifische Modell lediglich eine Konkretisierung bzw. Ergänzung der Vorgaben erforderlich ist. Auf der Ebene des ausführbaren Modells können Referenzmodelle einerseits in Form von organisatorischen Vorgaben und Richtlinien auftreten, andererseits aber auch in Form von Rahmenwerken als konkrete, zu bedienende Softwarearchitektur bzw. Beschreibungssystematik (vgl. [5]).

Obwohl eine saubere Trennung der Modellierungsebenen aus vielerlei Hinsicht sinnvoll und anzustreben ist, beispielsweise aus Gründen der Wart- und Änderbarkeit sowie Wiederverwendung, ist diese strikte Trennung nur selten anzutreffen (wie dies auch in der folgenden Abbildung 1 erkennbar wird). Die Gründe hierfür mögen vielfältig sein, dennoch können geeignete Referenzmodelle an dieser Stelle eine große Hilfe für die Modellierer sein und über die Bereitstellung einer akzeptierten, erprobten und, im Idealfall, validierten Grundlage letztlich zu einer verbesserten Modellqualität beitragen.

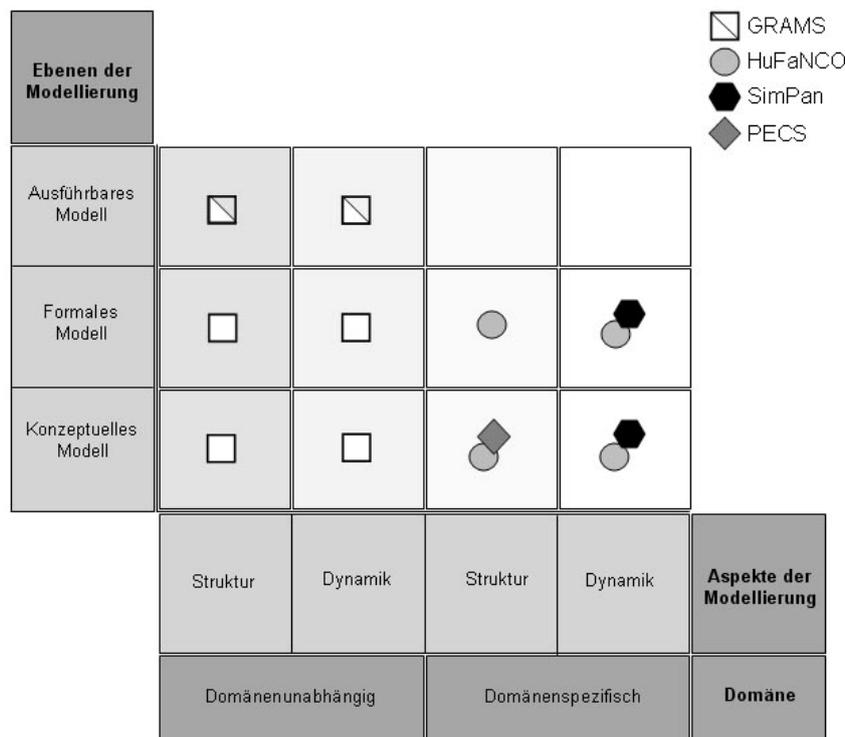
Auf jeder der drei Modellierungsebenen ist gleichermaßen zwischen den Modellierungsaspekten der Struktur und des Verhaltens zu unterscheiden. Für ein konkretes Simulationsmodell müssen auf jeder Modellierungsebene Struktur- und Dynamikbeschreibungen bereitgestellt werden. Strukturbeschreibungen auf der Ebene des konzeptuellen und formalen Modells fußen oft auf einem systemtheoretischen Ansatz und umfassen die Definition von Modellkomponenten sowie die Wechselbeziehungen zwischen diesen und tragen so maßgeblich zur Wahrung der Strukturähnlichkeit zwischen dem realem System und seiner Abbildung bei. Die Dynamikbeschreibungen für ein Agentensystem definieren den Ablauf von Prozessen innerhalb einer definierten Struktur auf Ebene des konzeptuellen, formalen und ausführbaren Modells in einer eindeutigen und zunehmend exakteren Weise.

Darüber hinaus lassen sich Referenzmodelle hinsichtlich ihres domänenunabhängigen oder domänenspezifischen Charakters unterscheiden. Derart existieren Referenzmodelle, die explizit als Vorlage für Agenten-basierte Modellierungen mit speziellem Fokus dienen und andere, die als technische Schablone für Agentensysteme dienen, unabhängig von einem konkreten Modellierungsgegenstand. Konkrete Beispiele werden im folgenden Abschnitt angeführt.

## 4 Einordnung vorhandener Referenzmodelle

In Abbildung 1 sind die drei Dimensionen, welche zur Klassifikation der Referenzmodelle herangezogen werden, grafisch dargestellt. Zudem sind in Abbildung 1 exemplarisch vier Referenzmodelle aus dem Bereich der Agenten-basierten Modellbildung und Simulation anhand dieser drei Dimensionen eingeordnet. Als Beispiele für etablierte Referenzmodelle, die den Modellbildungsprozess auf unterschiedlichen Ebenen unterstützen und sich den jeweiligen Kombinationen in Abbildung 1 zuordnen lassen, wurden exemplarisch die Referenzmodelle *PECS*, *SimPan*, *HuFaNCO* und *GRAMS* ausgewählt.

Das Referenzmodell *PECS*<sup>1</sup> (vgl. [13]) unterstützt den Entwurfsprozess Agenten-basierter Modelle zur Abbildung menschlichen Verhaltens auf konzeptueller Ebene indem es eine Menge von Modellkomponenten vorschlägt, die über kausale Abhängigkeiten und diskrete Informationsflüsse miteinander vernetzt sind. Das Referenzmodell *PECS* distanziert sich jedoch von Aussagen oder Vorgaben über das Verhalten der vorgegebenen Modellkomponenten.



**Bild 1:** Klassifikation verschiedener Referenzmodelle für die Agenten-basierte Modellierung entlang mehrerer Dimensionen

<sup>1</sup> Das Akronym ergibt sich aus den Anfangsbuchstaben der wichtigsten Komponenten des Referenzmodells: Physis, Emotion, Cognition und Social Characteristics.

Die Referenzmodelle SimPan<sup>2</sup> (vgl. [9]) und HuFaNCO<sup>3</sup> (vgl. [10]) sind auf der Ebene des konzeptuellen und formalen Modells angesiedelt. SimPan umfasst Modellierungskonzepte zur Abbildung der Wirkzusammenhänge verschiedener psychologischer Faktoren, die das Verhalten eines Menschen in Paniksituationen beeinflussen. Dabei wird keine explizite Modellstruktur vorgegeben, zur Strukturierung der Dynamikbeschreibungen jedoch die Verwendung von PECS empfohlen. Das Referenzmodell HuFaNCO stellt Modellierungsansätze zur detaillierten Abbildung des unperfekten menschlichen Wahrnehmungsprozesses bereit und definiert dabei neben Dynamikbeschreibungen auch eine konkrete Modellstruktur, welche ihrerseits an PECS angelehnt ist.

Im Unterschied zu den domänenspezifischen Referenzmodellen ist das Referenzmodell GRAMS<sup>4</sup> (vgl. [11]) explizit nicht an eine bestimmte Domäne gekoppelt. Stattdessen wird auf domänenunabhängige Weise definiert, welche Komponenten ein Agentenbasiertes Modell auszeichnen und welchen Wechselwirkungen diese unterliegen (bzw. wie auf Basis dieser Komponenten die Modelldynamik definiert ist). Obwohl vorwiegend als Referenzmodell auf der Ebene des konzeptuellen bzw. formalen Modells angesiedelt, erlauben die detaillierten Spezifikationen durchaus auch die Anwendung auf Ebene des ausführbaren Modells (in Abb. 1 durch ein diagonal geteiltes Quadrat angedeutet).

Abbildung 1 zeigt den Versuch einer Klassifikation der genannten Referenzmodelle entlang der verschiedenen Klassifikationsmerkmale. Es zeigt sich deutlich, dass eine oftmals leider nicht vorhandene saubere Trennung der Modellierungsebenen das Auffinden eines geeigneten Referenzmodells für einen bestimmten Anwendungsfall erschweren kann.

## 5 Zusammenfassung & Ausblick

Einhergehend mit steigenden Anforderungen an Modellqualität und die Wiederverwendung von Konzepten und Komponenten etablieren sich zunehmend auch im Bereich der Modellbildung und Simulation Referenzmodelle. Um eine stärkere praktische Nutzung von Referenzmodellen anzuregen und zu erleichtern, werden in dieser Arbeit die drei Dimensionen Modellierungsebene (konzeptuelles, formales oder ausführbares Modell), Modellierungsaspekte (Struktur, Verhalten) und Domänenunabhängigkeit zur Klassifikation von Referenzmodellen vorgeschlagen. Aufbauend auf diese grundlegenden Überlegungen zur Klassifikation, werden beispielhaft vier aktuelle Referenzmodelle (PECS, SimPan, HuFaNCO, GRAMS) für den Bereich der Agenten-basierten Modellbildung und Simulation in diese Klassifikation eingeordnet.

Einhergehend mit der Bestrebung weitere Referenzmodelle zu klassifizieren (z.B. [4]) und die gewählten Dimensionen zur Klassifikation zu verifizieren, ist eine Konkretisierung des Begriffes *Referenzmodell* im Kontext der Agenten-basierten Modellierung sinnvoll und notwendig, um ein gemeinsames Verständnis und eine zielführende Diskussion zu fördern.

Die größte Herausforderung jedoch liegt in der nicht vorhandenen, aber notwendigen Standardisierung der Beschreibung und Dokumentation von Referenzmodellen (vgl. [12], S. 34f. und [2], S. 16f.), sowie in der Erarbeitung und Etablierung eines Leitfadens zur

---

<sup>2</sup> Simulation of Human Behavior in Panic Situations

<sup>3</sup> Human Factors in Network Centric Operations

<sup>4</sup> General Reference Model for Agent-Based Modeling and Simulation

Referenzmodellierung, der, wo immer möglich, eine strikte Trennung zwischen den Modellierungsebenen erzwingt und die Schnittstellen zwischen diesen Ebenen klar definiert. Hier bietet sich die Erarbeitung und Etablierung eines Beschreibungsstandards für Referenzmodelle in Form einer Modellierungssprache an. Die Klassifikation von Referenzmodellen geht diesem Vorhaben voraus und stellt den Ausgangspunkt für den angestrebten Standardisierungsprozess dar. Hierdurch kann eine Vergleichbarkeit von Referenzmodellen erzielt werden, auf deren Basis wiederum belastbare Aussagen über die Güte von Referenzmodellen und damit Entscheidungshilfen für die Wahl eines Referenzmodells für einen bestimmten Anwendungszweck gegeben werden können. Die fortlaufenden und stetig wichtiger werdenden VV&A-Bestrebungen auf Ebene der problemspezifischen Simulationsmodelle können (und müssen) damit prinzipiell auch auf die Metaebene ausgedehnt werden, auf der sich die Referenzmodelle befinden.

## 6 Literatur

- [1] ASRM (2006): Agent Systems Reference Model – Release Version 1.0a, Editors: Mayk, I., Regli, W.
- [2] Fettke, P., Loos, P. (2004): Referenzmodellierungsforschung – Langfassung eines Aufsatzes. Working Papers of the Research Group Information Systems & Management, Paper 16, Mainz.
- [3] FIPA (2002): FIPA Abstract Architecture Specification, Foundation for Intelligent Physical Agents, Standard (06.12.2002).
- [4] Kugler, M., Franz, V. (2007): Entwurf eines multiagentenbasierten Referenzmodells für Simulationen im Hochbau, in: Schriftenreihe Bauwirtschaft (Universität Kassel), 1. IBW-Workshop Simulation in der Bauwirtschaft.
- [5] Modi, P.J., Regli, W., Mayk, I. (2006): The Case for a Reference Model for Agent-Based Systems, in: Proceedings of the IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06).
- [6] Rabe, M., Spieckermann, S., Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Springer-Verlag.
- [7] Russell, S., Norvig, P. (2003): Artificial Intelligence – A Modern Approach (2. Aufl.), Pearson Education.
- [8] Schmidt, B., Schneider, B. (2004): Agent-based Modelling of Human Acting, Deciding and Behaviour – The Reference Model PECS. In: Network Simulations and Simulated Networks, Proceedings zur Tagung “18th European Simulation Multiconference 2004”, Graham Horton (Ed.), S. 378-387.
- [9] Schneider, B. (2008): The Reference Model SimPan – Agent-based Modelling of Human Behaviour in Panic Situations. Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation (UKSim 2008), S. 599-604.
- [10] Schneider, B., Schwarz, G., Kunde, D. (2009): The Architecture HuFaNCO – Modeling Imperfect Human Information Processing with Special Reference to Network Centric Operations. In: Proceedings of the 18th Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS 2009), Sundance, UT, 2009, S. 23-30.

- [11] Siegfried, R., Lehmann, A., Khayari, R., Kiesling, T. (2009): A Reference Model for Agent-Based Modeling and Simulation. In: Proceedings of the Agent-Directed Simulation Symposium, Spring Simulation Conference, San Diego, CA, 2009.
- [12] Urban, C. (2004): Das Referenzmodell PECS – Agentenbasierte Modellierung menschlichen Handelns, Entscheidens und Verhaltens, Dissertation, Universität Passau.
- [13] Urban, C. (2007): Der Mensch im Simulationsmodell. Saarbrücken, VDM Verlag Dr. Müller.
- [14] Wang, Z., Lehmann, A. (2007): Verification and Validation of Simulation Models and Applications: A Methodological Approach. In: N. Ince and A. Bragg (Editors): Recent Advances in Modeling and Simulation Tools for Communication Networks and Services, Springer-Verlag.

# Development of a 3D model for packed bed liquid chromatography in microcolumns

Sebastian Schnittert, Remo Winz, Eric von Lieres  
e.von.lieres@fz-juelich.de

Institute of Biotechnology 2 / Research Center Jülich  
Wilhelm-Johnen-Str. 1 / 52425 Jülich / Germany

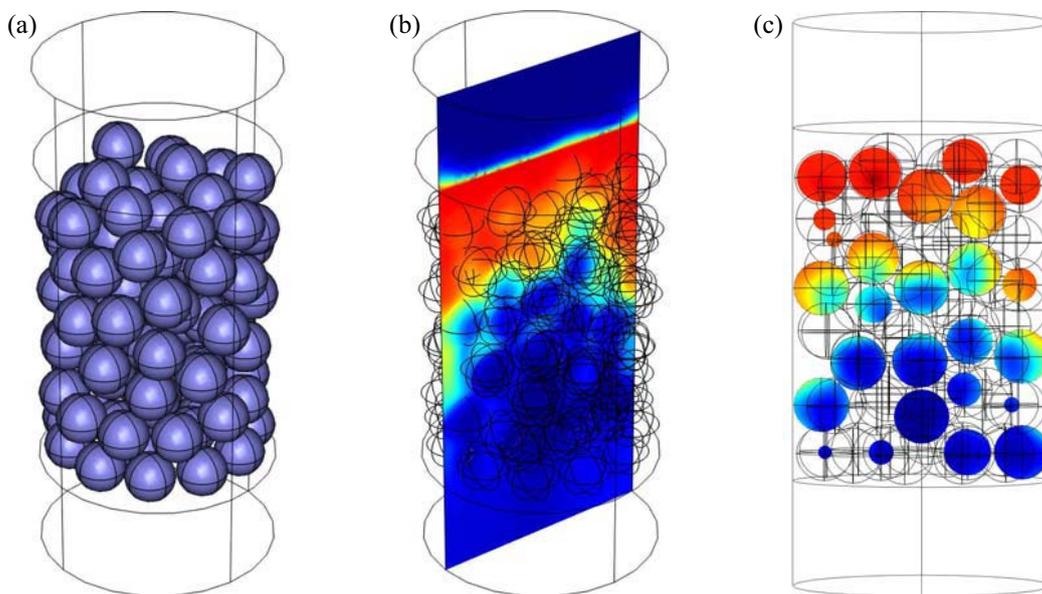
Column Liquid chromatography is a separation technique applied for both analysis and preparation of chemical compounds from complex mixtures. The chromatographic column is filled with a packed bed of porous beads. During the separation process the void fraction of the column and the particle pores are poured with a liquid buffer solution. Subsequently a diluted sample is pumped through the packed bed of beads. Depending on their properties, the residence time of the sample molecules inside the column is different. The solute molecules are transported through the column void fraction by convection and within the particle pores by diffusion.

For analysis and design of future chromatographic processes it is important to examine the impact of various process parameters. Experimentally, this can be done by high-throughput screenings on laboratory robotic platforms using very small columns. However, recent studies have shown that for such microcolumns the existing one-dimensional models are not sufficient [1]. Since a homogeneous bed is assumed, these models don't account for wall-effects, whose impact in microcolumns is considerably high. Hence a more sophisticated model needs to be employed, that comprises the spatially distributed geometric structure of the packed bed inside the column.

In the presented study a spatial model of a hypothetic microcolumn has been developed. Fluid dynamics are modeled by means of the Navier-Stokes equations. To describe mass transport phenomena, the commonly used one-dimensional nonlinear general rate model has been extended to three dimensions. The adsorption process on the internal surface of the beads is described by the Langmuir kinetic model. The geometry of the stationary phase is generated with Matlab. The usually applied slurry packing process for a column is modeled by an algorithm presented in [2]. It features a high correlation between the experimental and the numerical packing. The mesh is created and the model equations are solved using finite element methods with Comsol Multiphysics.

We successfully applied the model to a hypothetic microcolumn containing 100 particles as illustrated in figure 1(a). A two step strategy was used in order to reduce the computational effort during the simulation part. In the first step the flow profile surrounding the particles is computed by employing the Navier-Stokes equations. The resulting velocity profile is then stored and regarded as time-invariant for the second step. The second step is the transient computation of the mass transfer mechanics both outside and inside the porous beads.

The simulation exhibits the distribution of sample molecules inside the mobile phase as well as the concentration of adsorbed sample molecules on the internal surface of the beads. As can be seen from figure 1(b), in the vicinity of the vessel side-wall the molecules are transported very fast, due to the high void fraction. Hence the smearing of the concentration front becomes more prominent. The phenomenon of an uneven loading of the beads has been described in [3] and can be observed in figure 1(c). Furthermore the influence of the side-wall induced wall effects on the breakthrough curves was investigated by changing the bead diameter and the radial porosity distribution of the packed bed.



**Figure 1:** (a) Segment of a 3D packed bed of a hypothetical chromatographic microcolumn (b) concentration profile of sample molecules inside the mobile phase (c) concentration of adsorbed sample molecules on the internal surface of the beads

## References

- [1] *Winz, R., von Lieres, E.; Wiechert, W.:* Numerical Analysis of the Impact of Geometric Shape Patterns on the Performance of Miniaturized Chromatography Systems. Proceedings of the COMSOL Conference 2008, Hannover 4.-6. Nov. 2008.
- [2] *Mueller, G.E.:* Numerically packing spheres in cylinders. Powder Technology 159 (2005), pp. 105-110.
- [3] *Schnittert, S.:* Räumlich verteilte Simulation chromatographischer Trennprozesse im gepackten Bett auf Mikroliterskala mit COMSOL. Diploma Thesis, Research Center Jülich, 2009.

# **Aufbau eines Blended Learning Simulationskurses für die Ausbildung in Ereignisdiskreter Simulation mit den Simulationspaketen Arena und ED**

Markus Klug

Markus.Klug@technikum-wien.at

Institut für Advanced Technologies / Fachhochschule Technikum Wien  
Höchstädtplatz 5 / 1200 Wien, Österreich

## **Kurzfassung**

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit der Umsetzung eines ereignisdiskreten Simulationskurses mit den Simulationspaketen Enterprise Dynamics (ED) und Arena als blended Learning Einheit. Es erfolgte eine Aufteilung der gesamten Thematik in einen Präsenzteil mit den Themen Daten- und Ergebnisanalyse sowie der UML-basierenden Prozessfassung. Parallel dazu wurde einen Online Teil auf Basis des FH-internen Moodle Systems erstellt, wo die Teilnehmerinnen und Teilnehmer sich zwischen den beiden Simulationspaketen Arena und ED entscheiden konnten. Dies ermöglichte einerseits, den individuellen Lernfortschritt sicher zu stellen, aber gleichzeitig auch eine hohe Lernkurve zu garantieren. Beste Evaluierungen des Kurses mit mehr als  $\frac{3}{4}$  an Höchstbewertungen unterstrichen dieses erfolgreiche Konzept und die Relevanz des Themengebiets für den Studiengang „Internationales Wirtschaftsingenieurwesen“.

## **1 Einleitung**

Der berufsbegleitende Studiengang „Internationales Wirtschaftsingenieurwesen“ wurde zusammen mit dem Vollzeitstudiengang „Mechatronik/Robotik“, beide im Bachelor und Master System aufgebaut, erst kürzlich von der österreichischen Zeitschrift Format zu den besten Fachhochschulstudien für den Zweig Technik gekürt [1]. Gründe dafür sind unter anderem die modernen Ausbildungsmethoden, praxisnahe Fragestellungen und eine gute Infrastruktur, gepaart mit einer hohen Interaktivität mit den Studentinnen und Studenten zur Festsetzung der Ausbildungsschwerpunkte innerhalb des zugelassenen Rahmens. Eine eigene Institution, welche sich mit der Hochschuldidaktik beschäftigt[2], komplettiert dabei das Angebot an modernen Ausbildungsmethoden für die Ausbildungskräfte.

Eine dieser Fragestellungen war ereignisdiskrete Simulation als Lehrinhalt des 2. Semesters im Masterstudiengang. Dabei handelt es sich um ein Thema, welches im Vorfeld (WS 2008/09) als Begleitung anhand von Beispielmodellen während des Unterrichts wie auch als Fernlehrteil in einer anderen Vorlesung eingesetzt wurde. Der ausgewiesene und von den Studentinnen und Studenten selbst erkannte Nutzen im vorhergehenden Semester führte dazu, im Sommersemester 2009 dieses Thema schwerpunktmäßig zu lehren.

Aufgrund des Umstandes, dass die Studenten im Vorfeld mit zwei Tools, Arena und ED in Berührung gekommen sind, spaltete sich das Interesse auch dementsprechend, quer durch beide Gruppen auf. Der dadurch generierte nachdrückliche Wunsch, beide Tools anzubieten, welche den Studentinnen und Studenten zur selbstständigen Auswahl zur Verfügung standen, führte in Folge rasch zu einem blended Learning Konzept.

## 2 Das Ausbildungsgrundkonzept

Randbedingungen für diese Vorlesung waren:

- Insgesamt 30 Wochenstunden, gesplittet in 15 Einheiten Präsenzteil und 15 Einheiten Fernlehrteil für 2 Gruppen
- Vermittlung von allgemeinen Kenntnissen in Modellbildung und Simulation
- Vermittlung von Arena oder ED als Simulationspakete je nach Präferenz der Studentin resp. des Studenten
- Eingeschränkte zeitliche Verfügbarkeit der Auszubildenden aufgrund des berufs begleitenden Charakters
- Erreichung jener Praxisnähe, welche den Studentinnen und Studenten eine rasche Umsetzungsmöglichkeit für die Praxis erlaubt

Dementsprechend ergab sich bald die Notwendigkeit, über die klassischen Lehr – und Lernmethoden hinweg ein Ausbildungskonzept zu entwickeln, welches alle diese oben angeführten Randbedingungen beinhaltet. Dabei wurde nicht zuletzt beachtet, dass nicht alle Studentinnen und Studenten aus dem vorhergehenden gleichnamigen Bachelor Teil gekommen sind, sondern einige als Quereinsteiger schon entsprechende Vorkenntnisse auf dem einen oder anderen Gebiet aufwiesen, oder nicht die idente Ausbildung hatten. Zusätzlich war es notwendig, die Kenntnisse in Statistik, welche in hohem Maße divergierten zu vereinheitlichen. Als alle die für den Kursaufbau notwendigen Vorgaben und Rahmenbedingungen gesammelt wurden, ergab sich ein Bild für den Kurs, welches sich wie folgt darstellte:

1. Etablierung eines Präsenzteils mit den grundlegenden Themen der Modellbildung und Simulation, gültig für beide Pakete (Simulationsgrundlagen), im speziellen:
  - a. Prozesserfassung mittels UML
  - b. Daten- und Ergebnisanalyse sowie Modellverifikation mittels statistischer Methoden
2. Erstellung eines Moodle [3] basierenden Online Kurs für die beiden an der FH verfügbaren Simulationspakete Enterprise Dynamics und Arena, um den Studentinnen und Studenten die gewünschte Auswahlmöglichkeit zu geben (siehe Bild 2)

Der Moodle Kurs wurde unter Nutzung einiger bekannten Standardwerke [4], [5], [6], [7], und daraus ausgewählter und adaptierter Beispiele dahingehend aufgebaut, dass er einerseits die Grundlagen für Modellbildung und Simulation, unter Nutzung des jeweili-

gen Simulationspakets vermittelt wurde, andererseits aber gleichzeitig auch von Beginn an modellbasierend die Nutzerinnen und Nutzer ihre eigenen Erfahrungen sammeln konnten. Die Verfügbarkeit von Studentenversionen beider Pakete (entweder als Download [8] oder als Teil des Buches [5], [6]) erleichterte die Kursdurchführung in hohem Maße. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer konnten sich in Folge auch außerhalb des Campus mit dem Kurs beschäftigen.

Diese Verfügbarkeit der Studentenversionen war ein signifikant wichtiger Teil des Kurses. Einerseits stellte das gesetzte Limit für die Anzahl an modellbeschreibenden Elementen eine gute Grenze dar, Beispiele prägnant und abgeschlossen zu generieren, andererseits ermöglichten sie durch die Ortsunabhängigkeit die selbstständige Beschäftigung mit der Thematik.

Mittels der gelehrtens statistischer Verfahren wie auch dem Thema UML konnte für jene, die Simulation nicht weiter verwenden können, ein Zusatznutzen in der beruflichen Prozess- und Datenanalyse generiert werden.

## **2.1 Der Präsenzteil mit UML**

De facto jedes literarische Simulationswerk verfügt über eine grafische Prozessbeschreibungssprache. Beispielsweise hat Schriber [7], eine nachhaltig gültige Notation für die Blockdiagramme in GPSS/H durchgängig eingesetzt. Die Autoren von [10] haben für die grafische Darstellung ihrer Simulationsmodelle in der Java-basierenden, Open Source verfügbaren und ereignisdiskreten Simulationssprache DESMO-J [11] ihrerseits UML2 als grafische Repräsentation ausgewählt. In allen Fällen war es notwendig eine grafische Modellierungssprache als Grundlage zu etablieren. In Analogie zu [10] wurde grundsätzlich UML2 beibehalten, weil es nicht zuletzt den objektorientierten Ansatz von ED ergänzt. Aber auch Arena profitiert durch ein besseres Verständnis der Abläufe durch die Darstellung in Form der Aktivitätsdiagramme (siehe auch Bild 1).

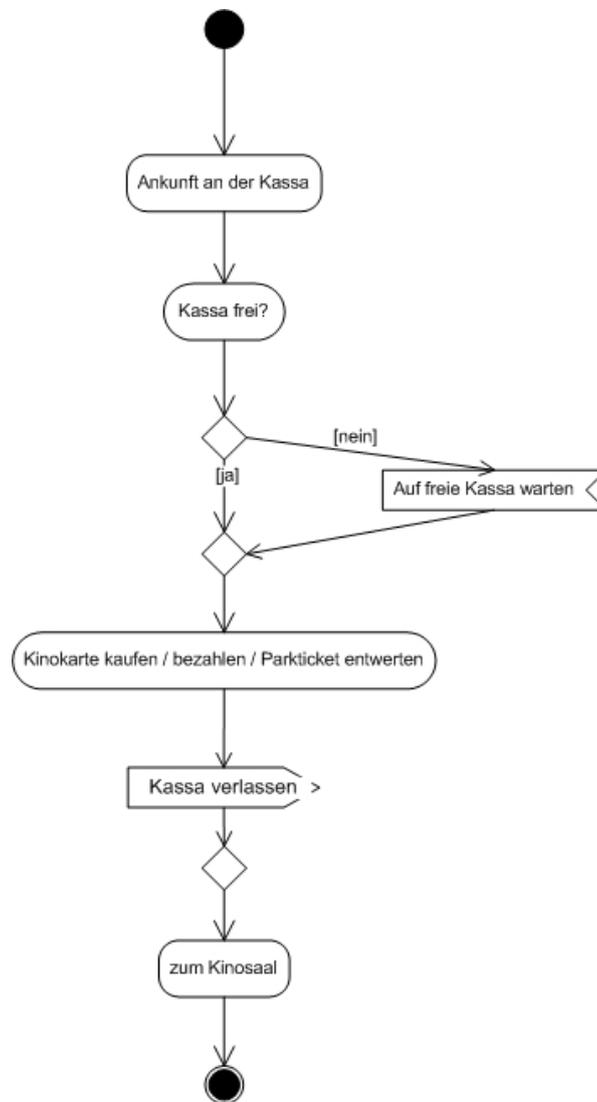
Trotzdem musste aus Zeitgründen eine Selektion der 13 möglichen Diagrammartent getroffen werden. Daher wurden die folgenden 4 Diagrammartent im Unterricht gelehrt:

- Klassendiagramm
- Aktivitätsdiagramm
- Anwendungsfalldiagramm
- Sequenzdiagramm

Als Anwendungsbeispiel zur Lehre dieser vier Diagrammartent wurde der SNE-Comparison 6 [12] ausgewählt. Er stellt gut dar, wie verbale, textuelle Beschreibung mit allen Varianten in eine grafische Darstellung in den 4 ausgewählten Diagrammartent konvertiert werden kann.

Des Weiteren wurde UML auch für den Online Kurs durchgehend eingesetzt, wie folgendes Bild 1 für das Job Shop Modell mit einer Kasse darstellt.

Die Kontrolle des erlernten Teils wurde ebenfalls über Moodle mittels einer spezifizierten UML Abgabe durchgeführt.



**Bild 1:** UML Diagramm eines Jobshop äquivalenten Modells für eine Kinokasse (Illustration des Seize – Delay – Release Elements).

## 2.2 Der Statistikteil

Im Statistikteil wurden die klassischen statistischen Tests wiederholt (F-Test, t-Test und Chi2-Test), um den Studentinnen und Studenten Basiswerkzeuge für die Datenanalyse der Eingangsdaten, aber auch für die Ergebnisanalyse zu geben. Dieser Teil überschneidet sich mit dem Moodle Kurs. Die Überprüfung des gelehrtens Inhalts erfolgte anhand durch selbst durchzuführende Tests der bei den Simulationspaketen dahinter liegenden Zufallszahlengeneratoren welche die Teilnehmerinnen und Teilnehmer abzugeben hatten. Auf diesen Aspekt der Ergebniserzeugung in den Simulationsumgebungen wurde, neben

dem Abgleich der Simulationsmodelle mit den analytischen Ergebnissen (falls vorhanden), hohen Wert gelegt.

### 2.3 Der e-Learning Kursteil

Der Kursaufbau war dahingehend gestaltet, dass die Auszubildenden zuerst eine erste Praxis mit dem Simulationstool bekamen, bevor sie die Grundlagen der ereignisdiskreten Simulation anhand des ausgewählten Simulators studierten. Nach diesem Theorieteil wurden komplexere Modelle gelehrt respektive als Aufgabenstellung gegeben.

Dabei wurde folgende Struktur für beide Pakete einheitlich beibehalten:

0. Installationsanleitung für die Nutzung der oben erwähnten Studentenversion
1. Einführung in die Simulationsumgebung
  - a. Aufgabe: Überprüfung der Kenntnisse anhand eines Kurzreports über ein ausgewähltes Demomodell
2. Das erste Simulationsmodell  
Erstmalige Erstellung des JobShop Modells anhand eines Beispiels „Kinokasse“
  - a. Aufgabe 1: Erweiterung um ein weiteres serielles Prozesselement (Einlösung eines Gutscheins für Popcorn)
  - b. Aufgabe 2: Erweiterung um ein weiteres paralleles Prozesselement (zweite Kassa)
3. Einführung in die grundsätzlichen Funktionalitäten des Simulationstools
4. Interna des Simulators, im speziellen Ereigniskette und Zufallszahlengenerierung
  - a. Aufgabe: Durchführen eines Chi2 Tests für eine ausgewählte Verteilung
5. Einführung in die jeweilige Experimentierumgebung der gewählten Simulationsumgebung
6. Etablierung gemeinsam genutzter Ressourcen (shared resources)
  - a. Aufgabe: Selbstständige Erstellung eines eigenen Modells eines spezifizierten Friseurladens mit anschließender Ressourcenoptimierung (Feststellung der Anzahl an benötigtem Personals)

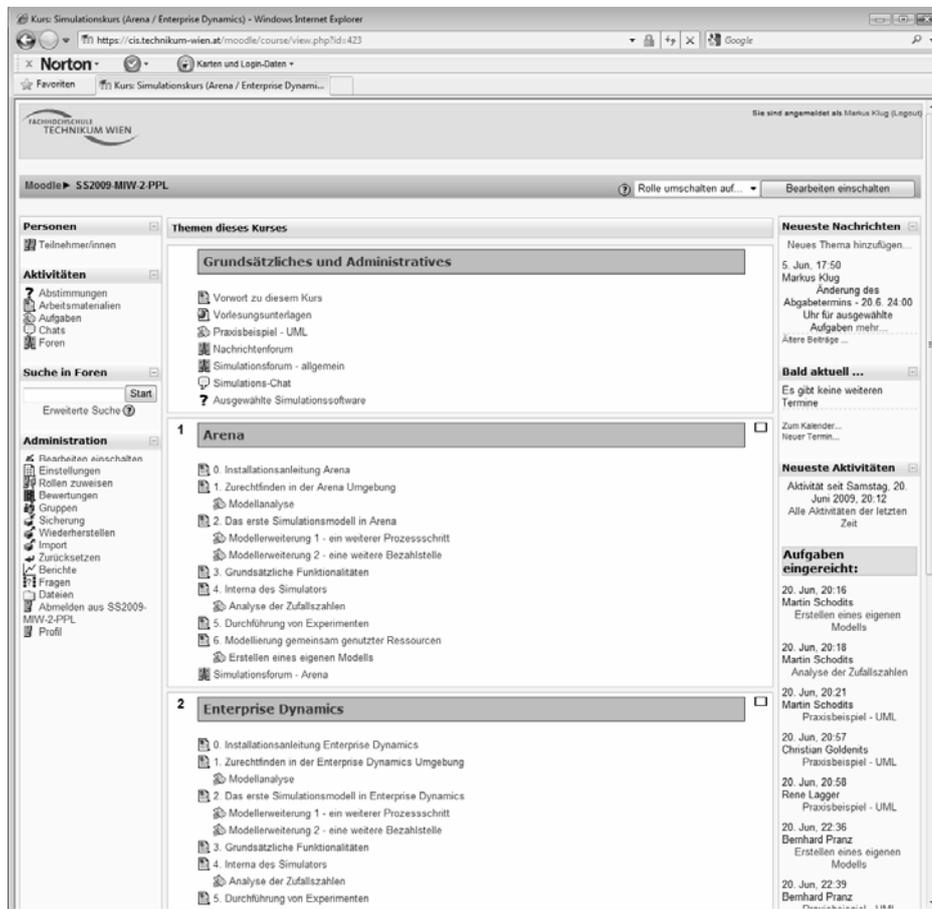
Vor allem Punkt 1 (Freiheit) stieß auf Irritationen, nachdem die Auszubildenden noch zu sehr auf ganz konkrete Fragestellungen gedrillt waren. Mit den abgeschlossenen Themen wurde Punkt 2 gut adressiert.

Ein Chatroom, vier Foren und das gesamte Management der Lehrveranstaltung über die IT-Infrastruktur ermöglichten ein effizientes Abwickeln des Kurses auch außerhalb der Unterrichtszeiten. Die vier eingerichteten Foren waren:

- generelles Nachrichtenforum
- Simulation allgemein
- Simulation mit Arena
- Simulation mit ED

Dabei war es am Anfang notwendig, auch die Teilnehmerinnen und Teilnehmer explizit auf diese weiterführenden interaktiven Funktionalitäten und ihre hohe Bedeutung für den Lernerfolg von Distance Learning hinzuweisen.

Die Abgabetermine für die Aufgaben wurden über das System klar kommuniziert. Ein Vorteil dieses Systems ist es, dass auf der Einstiegsseite demnächst fällige Termine angezeigt werden.



**Bild 2:** Überblick über die Moodle Kursstruktur.

## 2.4 Erfahrungen während der Lehrveranstaltung

Hinsichtlich der Plattform wurden eingangs grundlegende Bedenken laut. Andere Lehrbeauftragte nutzten sie leider zur Überwachung der Aktivitäten der Studentinnen und Studenten (was diese Plattform zulässt), daher fühlten sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer in ihrer jeweiligen freien Zeiteinteilung zu sehr eingeschränkt. Hier wurde ein Vertrauensverhältnis zwischen dem Lehrenden und den Studentinnen und Studenten aufgebaut, um diesen negativen Beigeschmack zu begegnen. Nichts desto trotz war es während des Semesters notwendig, auf den Zeitbedarf, der von den Studentinnen und Studenten definitiv unterschätzt wurde, hinzuweisen. Dies deckte sich mit den Diskussionen in den internen Weiterbildungsveranstaltungen, welche an der FH für diese online Plattform angeboten werden. Die Studentinnen und Studenten sind zu sehr an den vorlesungsseiti-

gen Wochenrhythmus gewöhnt, und haben es nicht ausreichend gelernt, sich das gesamte Semester entsprechend einzuteilen. Online Lehrveranstaltungen, welche diesen Wochenbezug hatten, wiesen grundsätzlich besseres Feedback auf, als jene, die hier über mehrere Wochen verteilt den Studentinnen und Studenten größere Freiräume boten.

Hinsichtlich der Basiskonfiguration des Systems wurden die Foren per default zu restriktiv ausgelegt. Studentinnen und Studenten konnten erst dann auf Informationen und Kommentare anderer Kolleginnen und Kollegen wie auch des Lehrbeauftragten zugreifen, wenn sie selbst zumindest einen entsprechenden Kommentar verfassten. Diesbezüglich wurde die Kurskonfiguration reviewed und die Einstellung für die Foren entsprechend angepasst.

Ein weiterer Punkt, dem in diesem Kurs begegnet werden musste, war die bis dato genutzte Funktionalität des Systems. Andere Lehrbeauftragte nutzten es einzig als Administrationsplattform zur Skripten- und Folienbereitstellung sowie zur Prüfungsabgabe. Damit wurde diese Plattform mit einem negativen Grundton versehen und es musste erst Überzeugungsarbeit geleistet werden, die Möglichkeiten des Tools zum effizienteren Informationsaustausch zwischen Lektor und den Studentinnen und Studenten sowohl als auch innerhalb der Studentinnen und Studenten zu akzeptieren.

### **3 Der Umgang der Studentinnen und Studenten mit den Freiheiten**

Wie schon erwähnt, waren die Studentinnen und Studenten nicht ganz in der Lage, die Zeiteinteilung auch entsprechend zu managen. Hier sind Hilfestellungen hinsichtlich des Managens der Termine sicher notwendig. Was die Bewältigung der Aufgaben selbst betrifft, waren die Teilnehmerinnen und Teilnehmer schon von einer Vorlesung im vorhergehenden Semester gewohnt, dass ihnen der Vortragende bei derartigen Aufgabenstellungen einen klaren Rahmen vorgibt, jedoch die Auszubildenden sich innerhalb diesem frei bewegen konnten. Diese neue Freiheit war auf Basis der gemachten Beobachtungen ein Ansporn für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer, sich hier bis zu einem gewissen Grad, selbst zu verwirklichen.

Auch hielt sich das Interesse an den interaktiven Foren zunächst in Grenzen. Dies besserte sich während des Semesters und wird auf Basis der gemachten Beobachtungen auf die „Forenüberflutung“ der Studentinnen und Studenten zurück geführt. Die Anzahl an teilzunehmenden Foren (private, berufliche und ausbildungsseitige) haben die Grenze des Machbaren überschritten.

### **4 Lehrveranstaltungsevaluierung**

Es ergab sich ein überaus positives Feedback. 77% evaluierten den Kurs mit Höchstnoten und 19% lagen nur einen Punkt darunter. In den verbalen Kommentaren der Evaluierungsbögen konnte man unter anderem auch finden: „... dass sie sehr gut vorbereitet war und inhaltlich schlüssig. Beste Vorlesung im Studiengang!“ Auf der anderen Seite stieß die Lehre eines Simulationsprogrammes für sich als komplette Remote Lerneinheit an die Grenzen der Auffassungsmöglichkeiten.

## 5 Literatur

- [1] <http://www.format.at/articles/0923/527/243499/format-uniranking-welche-absolventen-chancen-berufseinstieg>  
und  
<http://www.format.at/prod/520/pdf/uniranking.pdf> (abgerufen am 20. Juni 2009).
- [2] <http://www.dicfo.at/> (abgerufen am 20. Juni 2009).
- [3] <http://moodle.org/> (abgerufen am 20. Juni 2009).
- [4] Law, A.M, Kelton, W.D.: Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill Higher Education, 1999.
- [5] Kelton, W.D, Sadowski R.P., Sturrock D.T.: Simulation with Arena. McGraw-Hill Higher Education, 2006.
- [6] Rossetti M.D., Taha H.A.: Simulation Modeling and Arena. John Wiley & Sons, 2009.
- [7] Schriber T.J.: An Introduction to Simulation Using GPSS/H. John Wiley & Sons, 1990.
- [8] <http://www.incontrolsim.com/> (abgerufen am 20. Juni 2009).
- [9] Ståhl I.: TEACHING SIMULATION TO BUSINESS STUDENTS SUMMARY OF 30 YEARS' EXPERIENCE. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference (2007), S. 2327 – 2335.
- [10] Page,B ., Kreutzer, W.: The Java Simulation Handbook. Shaker Verlag, 2005.
- [11] <http://desmoj.sourceforge.net/> (abgerufen am 07. August 2009).
- [12] [http://www.argesim.org/uploads/tx\\_compdb/c6\\_definition.pdf](http://www.argesim.org/uploads/tx_compdb/c6_definition.pdf)  
(abgerufen am 07. August 2009).

# Vorbeugender Brandschutz durch Lernsimulationen

Lars Holbein, Andreas Siemon, Bheta A. Wardijono und Dieter Wloka  
lars.holbein@uni-kassel.de, asiemon@uni-kassel.de,  
awardijono@inf.e-technik.uni-kassel.de, wloka@inf.e-technik.uni-kassel.de  
Universität Kassel / Fachbereich Elektrotechnik / Informatik  
/ Fachgebiet Technische Informatik  
Universität Kassel, Wilhelmhöher Allee 71-73, 34121, Kassel

## Kurzfassung

Vorbeugender Brandschutz ist eine wichtige Komponente zur Vermeidung von Bränden [2], insbesondere in Gebäuden mit viel Publikumsverkehr. Eine Brandschutzunterweisung ist gesetzlich vorgeschrieben und verfolgt das Ziel, Schäden an Menschen und Materiellen Gütern zu verhindern. Die Koordination solcher Unterweisungen gestaltet sich in der Praxis oft schwierig, da beispielsweise durch Schichtarbeit nicht alle Mitarbeiter zur Verfügung stehen. Eine Idee ist die Integration von Lernsimulationen in die Brandschutzunterweisung. Bei diesem aktuellen Projekt soll konkret vor allem die Unterweisung von Mitarbeitern in einem Krankenhaus verbessert werden. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit Partnern von Krankenhäusern und der Feuerwehr durchgeführt. Zur Umsetzung des Lerninhaltes wurde in Zusammenarbeit mit Pflegedienstleitung und Feuerwehr-Experten eine typische Brandsituation des Alltags, wie sie in Krankenhäusern, Altenheimen oder Reha-Zentren vorkommt, ausgewählt. Für die entwickelte Lernsimulationen wurde ein virtuelles Krankenhaus erstellt. Zur Umsetzung dieses Inhaltes mussten künstliche Menschen, 3D Modelle und virtuelle Feuer erstellt werden.

## 1 Einleitung

Brandschutz ist Pflicht: Das Gesetz fordert Organisationen auf, die Arbeitnehmer und Arbeitnehmerinnen in den Themen Sicherheit und Gesundheitsschutz, demnach auch im Bereich Brandschutz zu unterweisen. Diese Unterweisung wird entweder einmal jährlich oder gar nicht durchgeführt und dementsprechend mehr oder weniger intensiv umgesetzt. Die Brandschutzunterweisung wird in der Regel von ausgebildeten Brandschutzbeauftragten als frontaler Lehrvortrag vor den Arbeitnehmer/Innen durchgeführt. Daraus ergeben sich in der Praxis immer wieder Probleme, da beispielsweise durch Krankheit oder Schichtarbeit nicht immer alle Schulungsteilnehmer teilnehmen können. So besteht die Gefahr, dass nicht alle Mitarbeiter im Bedarfsfall ausreichend geschult sind. Aus diesem Problem heraus wurden Lernsimulationen generiert die sich mit dem wichtigen Thema Vorbeugenden Brandschutz auseinandersetzen.

Um die Lerninhalte interessanter zu gestalten, wurde eine Story in Zusammenarbeit mit Experten des vorbeugenden Brandschutzes entwickelt. Die Story spiegelt eine typische Situation des Alltags in einem Krankenhaus wider. Dabei wird ein Geburtstag in

einem Patientenzimmer gefeiert. Durch eine offene Flamme bricht ein Brand aus, welche sich auf die Inneneinrichtung des Zimmers überschlägt. Der Brand wird entdeckt und das Pflegepersonal zeigt eine mögliche Handlungsweise auf, die in Zusammenarbeit mit Pflege- und Brandschutzexperten im Vorfeld erarbeitet wurde.

Die Story wurde in einem Drehbuchskript festgehalten. Es beinhaltet alle Komponenten, die für die Umsetzung der Lernsimulation notwendig sind. In dem vorliegenden Fall sind dies 3D-Modelle, Darsteller, Handlungen und Feuer.

## **2 Materialien und Methoden**

Wie bereits erwähnt, wurde für die Umsetzung der Lernsimulationen in Zusammenarbeit mit Brandschutzexperten ein Drehbuch erstellt. Durch eine Story wird eine realistische Situation erzeugt und die Ausbildung zum Verhalten im Brandfall unterstützt [1].

Zur Umsetzung des Drehbuches wurde die Software Celtx verwendet. Diese Software verfasst Drehbücher im Drehbuchstandardformat, wie es Filmproduktionen vorgeschrieben ist. Mit Celtx können Listen generiert werden, die spezifische Eigenschaften der Szene beinhalten, beispielsweise Requisiten, Dialoge oder Schauspieler.

Die enge Kooperation mit dem Krankenhaus ermöglichte es, ein detailgetreues 3D-Modell eines Krankenhauses zu erstellen. Hierzu wurde basierend auf 2D-Architekturplänen ein 3D-Rohmodell generiert. Dieses wurde weiter ausgebaut sowie Details hinzugefügt. Für die Details wurden Fotos von Türen, Fenster, Räume und auch Flure als Vorlage verwendet.

Durch das Einbinden von Architektenpläne wurde es ermöglicht, die virtuellen Zimmer innerhalb des Modells auszustatten. Dazu wurden 3D-Modelle eines Krankenzimmers, Intensivzimmers oder OP-Räume inklusive Ausstattung entwickelt.

Mit diesem 3D Modell ist es nun möglich Handlungen in verschiedenen Perspektiven zu betrachten, wie beispielsweise Sicht von Seite, Oben oder Vogelperspektive. Weiterhin besteht die Möglichkeit sich nur einzelne Stockwerke anzeigen zu lassen.

Bei den einzelnen Räumen wurde, wie auch schon zuvor bei dem Gebäude großer Wert auf Detailtreue gelegt, um die Wiedererkennbarkeit von Originalschauplätzen zu gewährleisten.

Die Darsteller, die in der Story vorkommen, werden durch künstliche Menschen (Avatare) dargestellt. Diese sind ebenfalls 3D-Modelle einer Person. Als Repräsentant eines Menschen, sollen Avatare als künstlicher Mensch auch dessen Eigenschaften übernehmen. Sie sollen sich beispielsweise bewegen können sowie sprechen oder handeln. Dazu wurde ein spezieller Prozess zur Entwicklung verschiedenster Avatare entwickelt [6].

Die Avatare können in Größe, Form, Aussehen und Sprache variieren. Dadurch können sowohl unterschiedliche Populationen als auch spezielle Fachavatare dargestellt und erzeugt werden. Zusätzlich ist es möglich, Bewegungen mit diesen Avataren zu verknüpfen und dadurch eine Animation zu erstellen. Die Bewegungen sind dabei in einer Datenbank gespeichert und können über spezielle Motion-Capturing Verfahren individuell aufgezeichnet werden. Dadurch sind auch spezielle Bewegungen, wie beispielsweise die Bedienung eines Feuerlöschers, darstellbar. Darüber hinaus verfügen die Avatare über eine Sprachausgabe. Die Sprachausgabe bedeutet in diesem Zusammenhang sowohl die Animation des Gesichts, als auch die Ausgabe der Sprache auf einem Audiosystem

und/oder der Ausgabe in einer Sprechblase. Die gesprochenen Worte können dabei durch einen Text vorgegeben werden.



**Bild 1:** Vergleich Krankenhaus original(links) und virtuell (rechts).

Neben der Sprache wird auch ein Teil der Mimik dargestellt, wie beispielsweise Augenzwinkern. Diese Mimik macht den Avatar noch realistischer und hilft zusätzlich seine Authentizität zu steigern.

Auf anthropometrischen Daten [5] aufbauend wurden bereits erste Avatare erstellt, die den Bevölkerungsquerschnitt darstellen. Diese Avatare entsprechen genauen Abmessungen, wie beispielsweise Körpergröße, Länge der Beine, Länge der Arme, Umfang des Kopfes oder Bauches usw.

Des Weiteren wurden für das Projekt Ärzte, Pfleger und Feuerwehrkräfte modelliert. Ihre Darstellungen entsprechen in beispielsweise der Kleidung den realen Vorbildern des Krankenhauses bzw. der deutschen Feuerwehr.

Derzeit sind neben diesen speziellen Fachavataren auch Alltagsavatare vorhanden. Diese sind beispielsweise Avatare in Geschäftsgarderobe, legerer Sportbekleidung oder auch im Schlafanzug.

Die Story sieht ein Brandgeschehen im Patientenzimmer vor. Dafür sind zum einen realistische Feuer sowie das Verhalten während des Brandes im Patientenzimmer in einer virtuellen Umgebung notwendig.

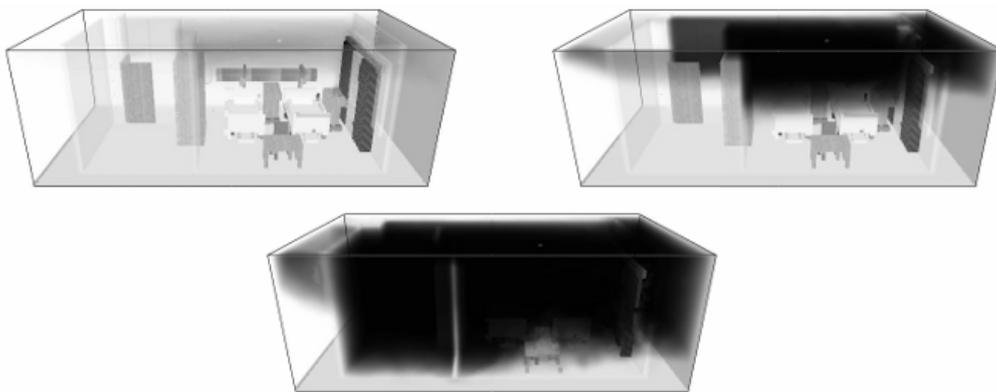
Das virtuelle realitätsgetreue Feuer besitzt neben der grafischen Simulation auch das Verhalten und die physikalischen Eigenschaften des Originals. So soll das Feuer bei der Verbrennung von verschiedenen Materialien beispielsweise Ausbreitungsgrad, Rauchverhalten etc. simulieren. Um diese zu erreichen, wurden die realistischen Modelle so konzipiert, dass einzelnen Objekten Brandeigenschaften zugewiesen werden konnten. Zur Simulation wird die Software Fire Dynamics Simulator (FDS) eingesetzt.

Mit der Software ist es zum Beispiel möglich, die durch den Brand entstehende Temperaturbelastung vorherzusagen. Ebenso können die optische Rauchdichte sowie die Rauchausbreitung berechnet und simuliert werden [4].

Die Feuersimulation mit FDS wird sowohl für komplexe Brandsimulationen [3] als auch von Ingenieurbüros für Brandschutz eingesetzt.

Im virtuellen Patientenzimmer wurden alle Materialien mit Brandeigenschaften versehen, wie beispielsweise Bett, Nachttisch oder auch Türen und Fenster. Durch die spezifizierten Materialien kann die Simulation sehr realistisch dargestellt werden und Komponenten wie Rauchausbreitung und Temperatur innerhalb des Zimmers simuliert werden. In Bild 2 ist eine solche Simulation während der Zeitintervalle 1, 5 und 10 Minuten zu sehen. Bei der Simulation wurden folgende Parameter gesetzt:

- Türen geschlossen
- Fenster gekippt
- Feuerquelle nach Story spezifiziert (Kerze auf Nachttisch)



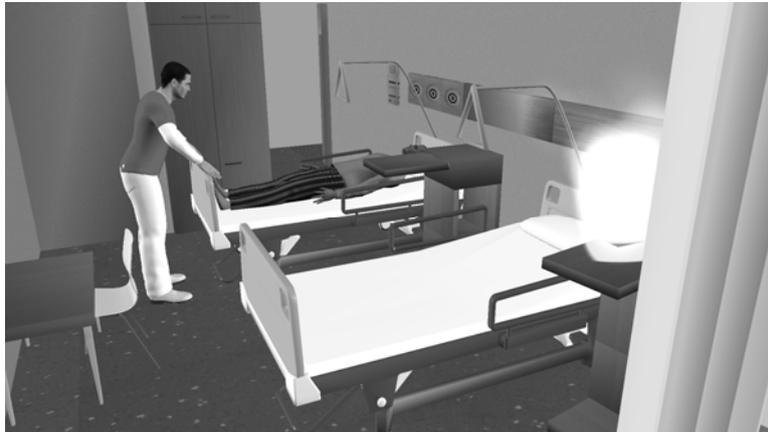
**Bild 2:** Brennendes Patientenzimmer mit der Software FDS.

Zusätzlich wurden die einzelnen Einrichtungsgegenstände nach Bild 3 spezifiziert.

Objekte / Modelle	Material
Tür	Holz
Nachttisch	Holz
Bett	Stahl
Matratze	Stoff & Schaumstoff
Gardine	Stoff
Versorgungsleiste	Plastik & Holz
Tisch	Holz
Stuhl	Holz & Stahl
Wand	Gips

**Bild 3:** Spezifizierte Materialien im Patientenzimmer.

Für die Simulation des Verhaltens im Brandfall wurde die Software Motionbuilder eingesetzt. Mit dieser ist es möglich die 3D-Modelle und die Avatare zu steuern. Zusätzlich können die Avatare über Mocapdaten animiert werden und diese Animation realistisch als Lehrvideo gerendert werden (vgl. Bild 4).



**Bild 4:** Simulation des Verhaltens im Brandfall.

### **3 Resultate und Diskussion**

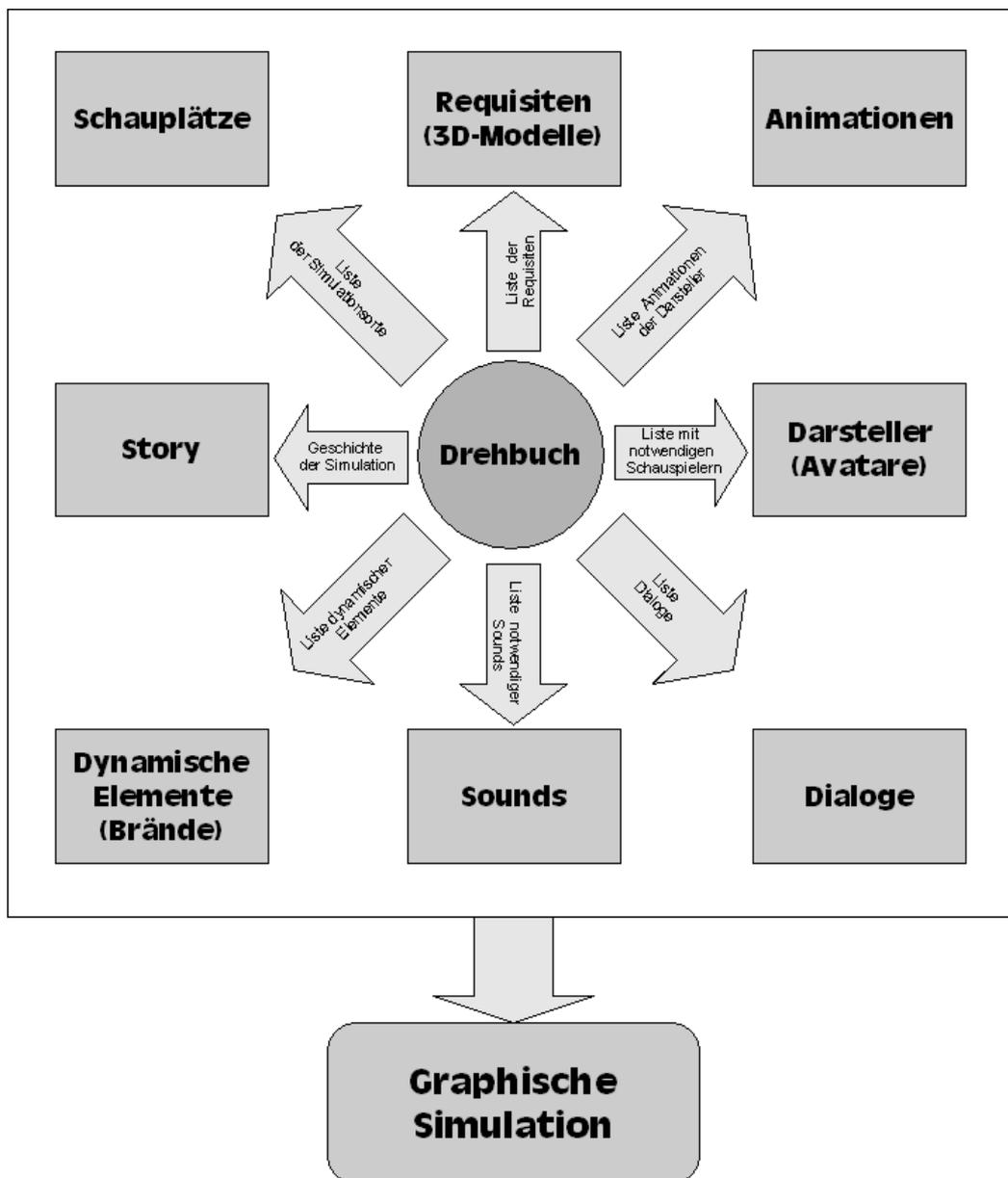
Es wurden Simulationen für den vorbeugenden Brandschutz erstellt und verschiedene Aspekte des Brandschutzes simuliert. Zum einen wurde ein Brand inklusive Rauchausbreitung eines Patientenzimmers im Krankenhaus simuliert. Zum anderen eine Simulation erstellt, die eine mögliche Rettungsmaßnahme bei Ausbruch eines Feuers im Patientenzimmer zeigt. Die Rettungsmaßnahme wurde dabei mit Experten aus Brandschutz und Pflegepersonal erstellt.

Das Brandgeschehen ist in der Realität bzw. Praxis nur schwer darstellbar, vor allem die Rauch- und Feuerausbreitung. Durch den Einsatz der Lernsimulationen in Brandschutzunterweisungen konnten sowohl das Verhalten im Brandfall als auch der Brand selber für die Teilnehmer der Unterweisung realistisch dargestellt werden. Dieses ist als Unterstützung für die Aus- und Weiterbildung zu sehen.

Die Nutzung eines Drehbuchs bei der Erstellung von Lerninhalten graphischer Simulationen zeigte in verschiedenen Bereichen Vorteile.

Zum Einen konnte durch den Einsatz einer Drehbuchsoftware die Zusammenarbeit zwischen Experten und Entwicklern vereinfacht werden. Dieses vereinfachte beispielsweise den Akt der Korrektur der Story. Dieses kann sowohl in Papierform als auch mit der Software geschehen. Auch die Definition der Szene, Requisiten und Schauspielern sind auf einen Blick zu sehen. Neben Listen statischer Elemente innerhalb der Story, können ebenfalls Listen mit dynamischen Inhalten erzeugt werden, wie beispielsweise Bewegungen von den Darstellern. Nach dem Review der Story können die Listen an die einzelnen Fachleute bzw. Fachabteilung wie 3D-Design, Animationen und Webdesignern verteilt werden.

Zum Anderen konnten durch die Entwicklung der Story früh Probleme aufgezeigt werden, die bei der Besprechung mit den jeweiligen Fachleuten auftauchten. Als Beispiel kann an dieser Stelle die Entwicklung der Strategie zur Rettung des Patienten aus dem Zimmer genannt werden.



**Bild 5:** Workflow zur Generierung von Graphischen Simulationen.

Durch die Verknüpfung verschiedener Technologien und Software konnte ein Workflow erstellt werden, der es ermöglicht einfach und effektiv Stories zu generieren und die Inhalte daraus zu extrahieren. Dabei steht im Zentrum, wie in Bild 5 dargestellt, das Drehbuch aus dem Listen für die einzelnen Fachleute erstellt werden. Die Story ist für Projektleiter bzw. Regisseur und zum Gegenlesen der Experten notwendig. In der Story sind Schauplätze, Requisiten, Animationen, Darsteller, Dialoge, Sounds und dynamische

Elemente enthalten. Schauplätze, Requisiten und Avatare werden mit 3D-Programmen, wie 3D Studio Max, erstellt. Animationen und Dialoge der Darsteller werden mit Motionbuilder realisiert, ein spezielles Programm zur Animation von Avataren. Für dynamische Elemente wurde die Software FDS eingesetzt. Aus allen Teilen folgt dann die graphische Simulation.

Der hohe Wiedererkennungswert der 3D-Modelle und Avatare sowie der vertrauten Schauplätzen, ermöglichte eine Identifikation mit den Inhalten der Simulation, so dass ein höheres Interesse bei den Anwendern entstand.

## 4 Zusammenfassung

Die entwickelten Simulationen für den vorbeugenden Brandschutz zeigten einen realistischen Brand im Patientenzimmer inklusive Rauchausbreitung sowie eine mögliche Rettung eines Patienten im Zimmer.

Zusätzlich wurde ein Workflow entwickelt, der verschiedene Technologien und Software einsetzt, um gezielt Lerninhalte zu entwickeln. Durch den Einsatz der richtigen Formate konnten fast alle Inhalte miteinander verknüpft werden. Momentan können Feuer und Rauch noch nicht mit Avataren und realistischen 3D Modellen zusammengeführt werden. Dies ist aber in einem weiteren Schritt vorgesehen, um die Qualität der Ausbildung weiter zu erhöhen.

Der definierte Workflow wurde bereits in einem weiteren Projekt eingesetzt, so dass effizient eine Simulation erstellt werden konnte.

Des Weiteren ist angedacht, die Simulationen in einen E-Learning Kurs zu integrieren. Dadurch können Brandschutzunterweisungen zeitunabhängig ausgeführt werden und stehen auch Schichtmitarbeitern jederzeit zur Verfügung.

Ist ein einheitlicher Modellstandard verfügbar soll in einer nächsten Phase ein Serious Game auf Basis dieser Story entwickelt werden, an der Teilnehmer aktiv das Verhalten im Brandfall trainieren können.

## 5 Literatur

- [1] *BBK Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe: Grundtätigkeiten - Lösch- und Hilfeleistungseinsatz.* Stuttgart: Deutscher Gemeindeverlag, 2007.
- [2] *Ehrlich, D. : Brandschutzunterweisung.* Landsberg: Ecomed, 2007.
- [3] *Lin, C.S. Wang, S.C. and Hung, C.B. : Investigation of fire smoke spread in a townhouse building, 7<sup>th</sup> International Aerosol Conference, 2006.*
- [4] *McGratten, K.B et. al. : Fire dynamics simulator (Version 4), technical reference guide, Maryland, NIST Special Publication, 2004.*
- [5] *Moss, S. et. al. : Anthropometry for WorldSID, a world-harmonized midsize male side impact crash dummy, Washington DC, Government/Industry Meeting, 2000.*
- [6] *Tümmler, J. : Avatare in Echtzeitsimulationen.* Kassel: Kassel University Press GmbH, 2007.

# **Ein e-learning System für MMT - Mathematik, Modellbildung und Tools, Systemerweiterung und Einbindung von graphischer Modellbildung**

Andreas Körner<sup>1</sup>, Günther Zauner<sup>2</sup>, Günter Schneckenreither<sup>1</sup>  
akoerner@asc.tuwien.ac.at

<sup>1</sup> Technische Universität Wien / Institut für Analysis und Scientific Computing  
Wiedner Hauptstraße 8–10 / 1040 Wien

<sup>2</sup> DWH Simulation Services  
Neustiftgasse 57–59 / 1070 Wien

## **Kurzfassung**

An der Technischen Universität Wien sind in den Lehrplänen vieler Studienrichtungen Lehrveranstaltungen zum Thema Modellbildung und Simulation beinhaltet. Diese Lehrveranstaltungen, von denen viele von der Forschungsgruppe Mathematische Modellbildung und Simulation betreut werden, haben einen praktischen Aspekt, der Umsetzung von Simulations-/Grundlagenmathematikaufgabenstellungen in unterschiedlichen Simulationstools. Den Studierenden sollen Modellbildungsmethoden vermittelt werden und sie sollen mit Simulatoren vertraut gemacht werden. Ein wichtiges Softwarewerkzeug ist MATLAB<sup>®</sup>, das eine weite Verbreitung in Industrie und Forschung hat und eine breite Palette an Modellbildungs- und Simulationsansätzen auf Grund seiner flexiblen Struktur ermöglicht. Zur e-learning basierten Simulationsanwendung wurde bisher der MATLAB-Webserver, ein Produkt von MathWorks, verwendet, der mit der MATLAB Version 2006 arbeitet und für neuere Releases nicht mehr unterstützt wird. Da diese Version den Anforderungen in Wissenschaft und Lehre nicht mehr gerecht wird, wurde ein eigenes Webserver - Tool programmiert das MATLAB über Web erfassbar macht. Dieser neue MATLAB-Webserver arbeitet mit der aktuellen MATLAB-Version. Die Interfaces sind standardisiert programmiert und es läuft ein generischer MATLAB-Code. Bezeichnung für dieses, vorrangig in der Lehre verwendete, System ist MMT - Mathematik, Modellbildung und Tools.

Der derzeitige Stand der Entwicklung ist ein System mit dem numerische als auch grundlegende symbolische Aspekte in der Mathematik behandelt werden können und Simulationsmodelle aus Naturwissenschaft und Technik vermittelt werden. Für die Mathematik sind Themen wie Koordinatensysteme, Lineare Algebra, Folgen und Reihen, Funktionen, Potenzreihen, Fourierreihen, Nullstellen-Iterationen und Funktionen mehrerer Veränderlicher verfügbar. Im Bereich mathematische Modellbildung reicht die Palette der implementierten Lehr- und Lernbeispiele von Übertragungsfunktionen und Infektionsmodelle in der Medizin über physiologische Modelle für Ergometertests hin zu physikalischen Konzepten der elektrische Schwingkreise, Roboter, Pendel und Festkörperdynamik. Die Entwicklung des Systems bewegt sich derzeit in zwei Richtungen. Ein Ziel ist, „parallel computing“ in das System mit einzubeziehen. Das zweite Ziel ist, MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup> zum Einsatz zu bringen. SIMULINK<sup>®</sup> wird in vielen technisch, naturwissenschaftlichen Gebieten eingesetzt ist und aufgrund der zu Grun-

de liegenden Blockstruktur für die Lehre gut geeignet. Diese Funktionalitäten sollen, analog zu den bestehenden MATLAB-Beispielen, über das Web via MMT für Studierende zugänglich gemacht werden.

Die Beispiele für die MMT-Plattform werden einer Standardisierung unterworfen. Da die Simulationsmodelle von Mitarbeitern der Forschungsgruppe selbst entworfen werden, ist Dokumentation und eine Qualitätskontrolle notwendig. Alle Beispiele müssen der Norm folgen. Diese Norm wird durch sieben Punkte gekennzeichnet. Nach dem Funktionsaufruf wird ein Header mit den wichtigsten Daten und einer kurzen Beschreibung eingefügt. Dies ist wichtig um die Zuordnung zu den Beschreibungstexten nicht zu verlieren. Anschließend werden die vom Benutzer mittels eines PHP-Interfaces definierten Werte eingelesen. Danach werden Modellparameter gesetzt, gefolgt vom eigentlichen Programm, also Berechnungen, Aufrufen von Solvern, etc. Daran schließt sich die graphische Auswertung und ein Bereich für zusätzliche Funktionen an. Am Ende werden die MATLAB-Files mit einer Schlussmarkierung gekennzeichnet.

Da das Einlesen und die Rückgabe der berechneten Ergebnisse Schnittstellen nur außerhalb von MATLAB bedient, ist der gesamte Lösungsalgorithmus klassischer MATLAB-Code und daher besonders für die Lehre geeignet.

Eine weitere Entwicklung ist das Einbinden der graphischen Simulationsumgebung SIMULINK. Diese eignet sich aus didaktischer Sicht dazu Modellbildung zu lehren und man hat Werkzeuge wie SIMSCAPE<sup>®</sup>, SIMEVENTS<sup>®</sup>, etc. über SIMULINK zur Verfügung.

## 1 Aufbau und Struktur

Entgegen anderer e-learning Plattformen dient das MMT-System nicht zum Prüfen von Umsetzungsfähigkeiten, sondern als reines Lehr- und Lerninterface. Mit dessen Hilfe erarbeiten die Studierenden zum einen Methodenwissen und lernen über Parameterstudien Zusammenhänge komplexer Systeme zu verstehen und können zum anderen durch direkte Einsicht des zu Grunde liegenden MATLAB-Codes eine der meist verbreiteten Simulationssprachen erlernen.

Das e-learning System für MMT ist an ein Content Management System geknüpft, das im Falle der Lehrveranstaltungen an der Technischen Universität Wien das TUWEL-System (TU Wien E-Learning System) darstellt. Die entsprechenden Beispiele oder das Kapitel mit Beispielen wird als Link mit User und Passwort an passender Stelle im TUWEL angegeben und Studierende können eigenständig den Link aufrufen und mit den Beispielen experimentieren.

Beim Aufruf des Links eines Beispiels oder einer Beispielgruppe öffnet sich ein PHP basiertes Webinterface, das strukturell für alle Beispiele gleich konzipiert ist. Zur Verdeutlichung des Aufbaus wird ein Beispiel aus dem Kapitel *Folgen und Reihen* aus der Beispielgruppe für Grundlagenmathematik ausgewählt. In diesem Beispiel wird numerisch der Grenzwert einer Folge dargestellt. Es wird die Folge

$$x_n = x_{n-1} + k \cdot x_{n-1} \cdot (1 - x_{n-1})$$

in Abhängigkeit des Anfangswerts und der Wachstumsrate  $k \in \mathbb{R}^+$  mit  $0 \leq k \leq 3$  untersucht. Diese beiden Parameter können für die Simulation von den Studierenden frei gewählt werden, ebenso wie die Anzahl der Folgenglieder. Als Anwendungsbeispiel kann diese Folge als Wachstumsgesetz einer Population interpretiert werden.

Der Aufbau der Ein- und Ausgabemaske ist in Abbildung 1 zu sehen. Das Interface ist in drei getrennte Bereiche gegliedert. Der Kopf enthält die Kapitelüberschrift, eine kurze Einleitung in der linken Häl-

### 9. Folgen und Reihen

Das neunte Kapitel ist den *Folgen* und *Reihen* gewidmet. Es dient dazu einen Überblick zu vermitteln und den Begriff des *Grenzwertes* kennen und anwenden zu lernen.

**begrenzttes Wachstum**  
 Motivation: Anwendung trig. Reihe  
 Beispiel zur geom. Reihe  
 Eulersche Zahl  
 Fibonacci - Folge

**Konvergenzuntersuchungen**  
 Grenzwert einer Folge  
 Reihenmotivation

Dieses Beispiel dient als Motivation zum nachfolgenden Kapitel *Folgen und Reihen*. Es stellt ein diskretes Modell des begrenzten Wachstums einer Population dar und genügt in jedem Schritt der Gleichung:  
 $x(n) = x(n-1) + k * x(n-1) * (1 - x(n-1))$   
 In dieser Gleichung stellt  $k$  die Wachstumsrate dar, es gelte:  $0 < k <= 3$ .  
 Mit  $A$  wird der Anfangswert der Population bezeichnet, es gelte  $0 < A <= 1 + 1/k$ .  
 $N$  ist die Anzahl der zu berechnenden Folgenglieder.

Testen sie auch die Parameterkombination  $A=0.1, k=3, N=50!$

Anfangswert A:

Wachstumsrate k:

Anzahl der Folgenglieder N:

[view mfile](#)

Abbildung 1: Screenshot der Ein- und Ausgabemaske des e-learning Systems für MMT

te und die Beispielliste in der rechten Hälfte. Unterhalb ist links das Fenster mit Angabetext und dem Eingabebereich der Parameter eines zuvor gewählten Beispiels und rechts der Lösungsbereich in dem textuelle Ausgaben oder Grafiken dargestellt werden.

Da die Studierenden neben dem Kennenlernen von mathematischen Beispielen und Konzepten aus der Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme auch mit MATLAB vertraut gemacht werden sollen, ist ein Link im linken unteren Fenster verfügbar (`view mfile`), durch den man auf das zugrundeliegende MATLAB-File verwiesen wird. Studierende können sich dadurch den Programmcode einsehen und Programmierkenntnisse erwerben. Darüber hinaus werden im Zuge der Lehrveranstaltungen Aufgabenstellungen zum selbständigen Lösen ähnlicher Problemstellungen vergeben um die erworbenen Fähigkeiten zu erweitern.

Die MATLAB-Files für das MMT-System sind eigenprogrammiert, wobei aus Gründen der Qualitätssicherung und Übersichtlichkeit eine Standardisierung der Beispiele eingehalten wird. Ein m-File gliedert sich dabei in Abschnitte, die im Folgenden überblicksweise zusammengefasst sind und anschließend genauer ausgeführt.

- Unmittelbar an den Funktions-Header schließt ein M-File-Header an.
- Einlesen der Eingabewerte des Benutzers und setzen der Modellparameter.
- Eigentlicher Programmcode bzw. Berechnungsalgorithmen.
- Graphische Aufbereitung der Ausgabe.
- Zusätzliche Funktionsaufrufe.
- Schlussmarkierung.

Die M-Files für das MMT-System sind als Funktionen programmiert, die beim Aufruf eines Beispiels am Server gestartet werden. Die erste Zeile in einem M-File muss also der Funktions-Header sein.

Unmittelbar anschließend wird der sogenannte *M-File-Header* angeführt. Dies ist der Header mit Informationen für das MMT-System um die Organisation und Administration der Beispiele zu erleichtern. Im Folgenden ist ein Header eines zufälligen Beispiels eingefügt.

```
% ~~~~~
% Short description of example:
%
% TOPIC:      basic math and matlab
% CHAPTER:    motivation
% EXAMPLE:    Geschoss
% ID:         0
% KEYWORDS:   basic mathematics, application
% DESCRIPTION: A bullet is sparking out of a pipe. Depending on the
%              incline of the pipe, the starting velocity and the height
%              of the pipe outlet the timepoint of hitting the ground is
%              calculated.
% AUTHORS:    xy
% LAST UPDATE: DD.MM.YY oder YYYY-MM-DD
% BY:        xy
%
% Part of the MMT E-Learning Platform by ASC-MMS and DWH.
% ~~~~~
```

Der Header beinhaltet das Thema (TOPIC) als größte Gliederung und das Kapitel (CHAPTER) als Verfeinerung der Gliederung der Zugehörigkeit des Beispiels. Der Titel des Beispiels wird in EXAMPLE festgelegt. Eine eindeutige Nummer (ID), Schlüsselwörter (KEYWORDS) um über den Inhalt des Beispiels schnell Bescheid zu wissen sowie eine kurze Beschreibung (DESCRIPTION). Das Kurzzeichen des Autors (AUTHOR), das letzte Datum der Aktualisierung (LAST UPDATE) und das Kurzzeichen des letzten Bearbeiters (BY) schließt den Informations-Header ab.

Bei der ID Zuweisung ist für Beispiele aus dem Themenbereich „basic math and matlab“ das Format xxx oder xxx\_ABC vorgegeben, wobei ein x eine Zahl darstellt. Über ein Kapitel sind die ersten beiden Ziffern konstant, Unterversionen werden durch angefügte Buchstaben unterschieden.

Als nächster Abschnitt folgt der *Bereich für das Einlesen von Eingabewerten*. In diesem Bereich muss ein für das MMT-System spezifischer Code verwendet werden. Dies ist einer der wenigen Abschnitte, wo der Code vom Standard-MATLAB-Code abweicht. Der Abschnitt wird durch einen standardisierten Kommentar gekennzeichnet. Im Folgenden ist ein beispielhafter Abschnitt dargestellt.

```
%% EXTRACTION OF INPUT VALUES %%%%%%%%%%
% Input values from the web-interface must be extracted from a text string.
%%%%%%%%%

%===== BEGIN OF SPECIFIC CODE - CUT HERE =====
n = str2double(instruct.var1); %
%===== END OF SPECIFIC CODE - CUT HERE =====
```

Die weiteren Abschnitte werden analog gekennzeichnet, es wird als Überschrift im Kommentar lediglich EXTRACTION OF INPUT VALUES durch den entsprechenden Titel des Abschnitts ersetzt. Als Schlussmarkierung wird eine standardisierte Abschlusszeile im Stil des obigen Abschnittes eingefügt.

Eine Besonderheit des e-learning Systems für MMT ist die Verwendung vom Standard-MATLAB-

Code. Zu klassischen MATLAB-Files ist der einzige Unterschied, dass für die Verarbeitung mit PHP spezifische Befehle vorzusehen sind. Da dieser Code sich vom Standard-MATLAB-Code sehr unterscheidet, es den Studierenden aber erlaubt ist die Files zu lesen, muss dieser spezifische Code erkennbar sein. Diese Markierung wird durch eine standardisierte Kommentarzeile vorgenommen.

```
%===== BEGIN/END OF SPECIFIC CODE - CUT HERE =====
```

Insbesondere das Einlesen von Eingabewerten, der Plot-Befehl zur Darstellung von Grafiken und textuelle Ausgaben sind unterschiedlich im Vergleich zu Standard-MATLAB-Code. Beispielsweise sind die Eingabewerte aus einem Eingabestrom auszulesen. Dies sieht beispielsweise folgendermaßen aus.

```
igai =str2num(instruct.var1);
```

Der Grund, ein eigenprogrammiertes System zu verwenden, ist einerseits, dass es zur Zeit keine neue Version des MATLAB-Webservers gibt und andererseits auf dem e-learning System auch freie Software zugänglich gemacht werden kann. Die Studierenden können dadurch via Internet auf dieser Plattform lernen und experimentieren und sind nicht an ein MATLAB an einen lokalen Rechner gebunden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Struktur des eigenprogrammierten Systems es erlaubt, mehrere Kerne von MATLAB pseudoparallel zu nutzen, nicht im Sinne von „parallel computing“, sondern durch Abarbeitung von mehreren Programmen unterschiedlicher Nutzer zur gleichen Zeit.

## 2 Einsatz in der Lehre

Das e-learning System für MMT wird an der TU Wien in der Lehre für Studierende der Studienrichtungen Technische Mathematik, Elektrotechnik, Informatik, Vermessungswesen und Maschinenbau verwendet. Bei den Studierenden des Vermessungswesen ist das Anwendungsgebiet hauptsächlich auf Grundlagenmathematik eingeschränkt. Dort wird die Vorlesung und Übung mit dem e-learning System begleitet. In der Technischen Mathematik und Informatik werden damit vorrangig die unterschiedlichen Modellbildungszugänge und Simulationsbeispiele gelehrt. Studierende haben durch das System die Möglichkeit, Erfahrung mit verschiedenen Anwendungsbeispielen und Modellansätzen zu sammeln.

Die Lehre an der TU Wien wird mittels eines Moodle basierten Systems (siehe [4]), dem TUWEL-System organisiert. Der Kurs ist nach Wochen bzw. Themengebieten strukturiert und an passender Stelle wird, wie oben beschrieben, ein Link auf ein Beispiel bzw. auf ein Kapitel am MMT-System gegeben.

Bei den Lehrveranstaltungen zur Modellbildung und Simulation für Technische Mathematik und Informatik sind die Kursblöcke einzelnen Themen gewidmet. Die Themengebiete entsprechen je einem Vortrag bzw. Vortragsblock und das MMT-System wird zur Vorführung in der Vorlesung selbst verwendet. Die Beispiele werden demnach dazu verwendet um theoretische Grundlagen praktisch zu verdeutlichen.

In der Lehre der Grundlagenmathematik für Vermessungswesen, wird ein Teil der Vorlesungszeit darauf verwendet, Beispiele aus den Themengebieten zu präsentieren, die theoretisch in der Vorlesung durchgenommen werden. Die zugehörige Übung ist ebenfalls MATLAB orientiert, d.h. es werden Aufgaben gestellt die mit MATLAB gelöst werden müssen. Bei der Vorlesungsprüfung, die schriftlich und mündlich abzulegen ist, ist ebenfalls ein Beispiel mit MATLAB-Code zu bewältigen. Es werden Code-Fragmente als Angabe gegeben und die Studierenden müssen den Code analysieren bzw. Erweiterungen zu dem vorhandenen Programm angeben.

### 3 Einige SIMULINK Beispiele aus der Modellbildung

Über das e-learning System für MMT ist auch SIMULINK einsetzbar. In diesem Abschnitt soll anhand von zwei ausgewählten Beispielen gezeigt werden, wie SIMULINK didaktisch eingesetzt wird und die Bedeutung von SIMULINK aus Sicht der Modellbildung zeigen.

Ein Beispiel aus der Telekommunikation ist eine Übertragungsstrecke mit einem Raised-Cosine Filter (siehe Abbildung 2). Diese wird dazu verwendet den Einfluss von Intersymbolinterferenz zu studieren. Intersymbolinterferenz bedeutet, dass zeitlich lokalisierte Signale bei der Übertragung die Lokalisation verlieren und es somit zu einem zeitlichen Übersprechen kommt. Das Raised-Cosine Filter kann diesen Einfluss, in Abhängigkeit eines Parameters, des so genannten Roll-off Faktors  $\alpha$ , korrigieren. Dieser Faktor nimmt also direkten Einfluss auf die Übertragungsqualität. Der Übertragungskanal ist ein Kanal mit additivem weißem gaußschen Rauschen (AWGN - additiv white gaussian noise)

$$Y = X + Z,$$

wobei  $X$  ein gesendetes Symbol,  $Y$  das empfangene Signal und  $Z \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$  das gaußsche Rauschen bezeichnet. Die übertragenen Daten werden mit einem Zufallszahlengenerator erzeugt und das QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) Modulationsformat wird verwendet. Der Einfluss des Roll-off Faktors wird deutlich, wenn die Symbole nach dem Filter analysiert werden. Dies geschieht in einem Augendiagramm, in dem die zeitliche Lage der Symbole zu erkennen ist.

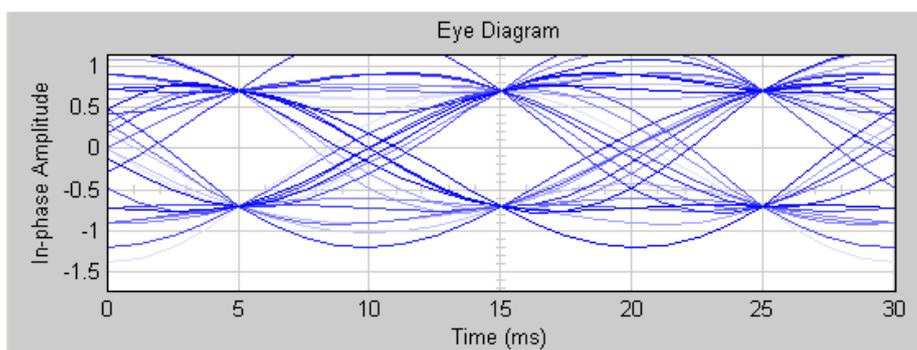
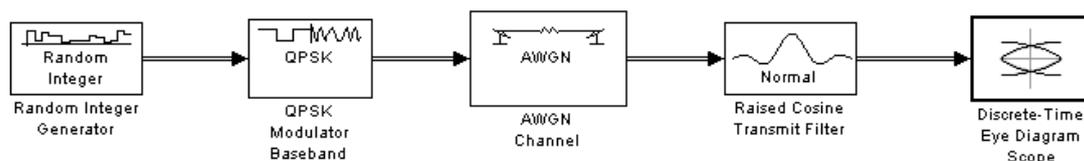


Abbildung 2: SIMULINK Blockschaltbild einer Datenübertragungsstrecke und Darstellung der empfangenen Symbole im Augendiagramm

Abgesehen vom Einfluss des Roll-off Faktors des Raised-Cosine Filters kann auch die Rolle des AWGN-Kanals untersucht werden. Der Kanal für sich hat zwei wichtige Parameter, die Leistung des Eingangssignals und das Verhältnis  $\frac{E_b}{N_0}$ . Nun kann auch der Einfluss dieser beiden Parameter auf die Übertragungsqualität der Übertragungsstrecke untersucht werden. Das Verhältnis  $\frac{E_b}{N_0}$  hat direkten Einfluß auf die Bitfehlerwahrscheinlichkeit, wohingegen die Leistung des Eingangssignals auf die

Bitfehlerwahrscheinlichkeit keinen Einfluss hat. Dieser Zusammenhang kann anhand dieses Simulationsmodells durch Parameterstudien nachvollzogen werden.

Da SIMULINK eine blockorientierte Modellbeschreibungssprache mit einer Reihe an Erweiterungen ist und gleichzeitig objektorientierte Ansätze auch in der Modellbildung und Simulation verstärkt zum Einsatz kommen, ist es ein Ziel, diese neuen Technologien auch in Kombination verstärkt am MMT-System einzusetzen und so die Einsatzbereiche des Systems zu stärken.

Neben klassischen SIMULINK-Modellen wird daher der textbasierte Zugang und die Kombination von Teilmodellen forciert. Als Anschauungsbeispiele aus dem Bereich der Regelung in physiologischen Systemen seien hier die Modellbildung und Simulation der Haemodialyse und des Glukosekreislaufs angeführt. Beide Modelle sind Kompartimentmodelle und dienen daher zur Abbildung des zeitlichen dynamischen Zusammenhangs von Dosis, Absorption, Distribution, Metabolisierung und Elimination. Beide Kompartimentmodelle werden am MMT-System sowohl klassisch (siehe dazu z.B. Abbildung 3), als auch durch Definition der einzelnen SIMULINK-Blöcke umgesetzt, deren Parametrisierung und Verbindungen der einzelnen Komponenten in einem MATLAB-Skript aufgeführt sind.

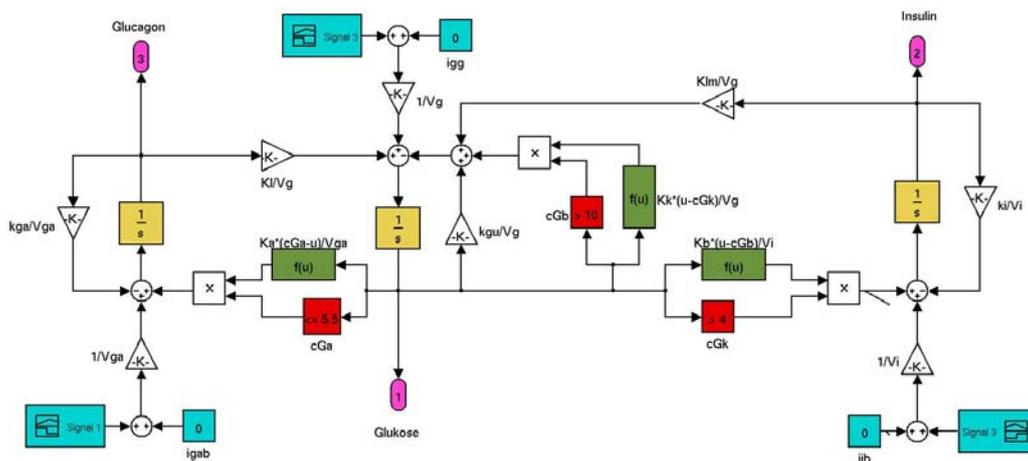


Abbildung 3: SIMULINK Blockschaltbild eines klassischen Glukosekreislaufes

Zusammenfassend sieht man aus den hier angeführten Beispielen klar, dass das MMT-System der Technischen Universität Wien neben der rein MATLAB basierten Umsetzung von e-learning Beispielen, auch geeignet ist SIMULINK und weitere Toolboxes in das System zu implementieren und so sukzessive die Kapazitäten und Anwendungsbereiche zu erweitern.

Darüber hinaus bietet die flexible Ein-/Ausgabemaske die Möglichkeit neben MATLAB auch weitere, freie Softwareprodukte an das System anzubinden und zu verwenden. Derzeit ist bereits OCTAVE für Basismodelle angebunden. Da zwischen MATLAB und OCTAVE eine hohe Programmcodekompatibilität besteht können diese Beispiele identisch auf beiden Tools zum Einsatz kommen. Die standardisierte Oberfläche garantiert dem Benutzer eine verkürzte Einarbeitungszeit und einfache Handhabung.

Aktuell laufende Erweiterungen des Systems sind eine Umstellung auf ein neues CMS mit einer Reihe an Zusätzen, wie etwa ein Java basierter Editor und die Einführung zusätzlicher Hierarchieebenen zur leichteren Verwaltung.

## 4 Conclusio

Abschließend seien noch einige Punkte zum MMT-System herausgearbeitet. Das MMT-System ist keine Plattform auf der MATLAB gelehrt oder gelernt werden soll. Das System ist für Modellbildung und Simulation, respektive Mathematik konzipiert. Aus der Tatsache heraus, dass MATLAB die Simulationssoftware ist, die dem System zugrunde liegt, kann aber auch ein gewisser Beitrag zum Erlernen und Beherrschen von MATLAB geleistet werden. Die Studierenden bekommen Modelle aus technischen und naturwissenschaftlichen Gebieten präsentiert, mit denen Sie beispielsweise Parameterstudien durchführen oder Effekte beim Simulieren studieren können. Durch die Verfügbarkeit der M-Files haben die Studierenden zusätzlich die Möglichkeit den MATLAB-Code zu lesen und dadurch ihre Fähig- und Fertigkeiten im Zusammenhang mit MATLAB zu verbessern.

Im Vergleich dazu die direkte Verwendung von MATLAB. Diese würde Probleme, wie die Version von MATLAB, die bei einigen Studierenden unterschiedlich sein kann, aufwerfen. Das MMT-System bietet außerdem viel verbundenen Text der erklärend oder einleitend wirken soll. Dieser könnte zwar auch als Kommentar in ein M-File direkt eingebunden werden, jedoch schmälert das die Lesbarkeit des Files ungemein.

Das MMT-System ist auf die Lehre und Arbeitsgebiete der Forschungsgruppe ausgelegt und angepasst. Es kann jedoch an Gebiete, die ohnedies MATLAB als Simulationssoftware verwenden oder durch diese erfassbar sind, mit entsprechendem Aufwand angepasst werden. Das letzte Gebiet das erschlossen wurde und woran derzeit noch gearbeitet wird, ist das Gebiet der Telekommunikation. Nachrichtentechnische Methoden und Verfahren können mit MATLAB dargestellt und ins MMT-System integriert werden. Insbesondere SIMULINK steht im Fokus, da dies, wegen der blockorientierten Beschreibung der Denkweise der Telekommunikation ähnlich, sich didaktisch gut eignet. Abgesehen davon bieten Toolboxen wie Communications-Blockset oder Signal-Processing Blockset passende Werkzeuge um Modelle effizient beschreiben zu können.

## 5 Literatur

- [1] *Judex F., Hametner B., Breitenecker F.*: E-Learning mit MATLAB in Mathematik Grundvorlesungen. Wismar: ASIM Workshop, 2008.
- [2] *Judex F., Zauner G., Breitenecker F.*: Introducing MATLAB into Basic Mathematic Lectures Using a Custom E-Learning System. Cavtat: 30th Int. Conf. on Information Technology Interfaces, 2008.
- [3] *Ernst A., Judex F., Höbarth J.*: Modelling the Human Blood Glucose Regulation - a MATLAB GUI for Educational Purposes. Wien: Simulation News Europe SNE, 2006.
- [4] *Gertsch F.*: Das Moodle 1.8-Praxisbuch. München: Addison-Wesley, 2007.

# **Blended-learning mit Maple T.A.<sup>®</sup> in der Lehre für Mathematik und Modellbildung**

Andreas Zimmermann, Andreas Körner, Felix Breitenecker  
andreas.zimmermann@tuwien.ac.at  
Technische Universität Wien / Institut für Analysis und Scientific Computing  
Wiedner Hauptstraße 8–10 / 1040 Wien

## **Kurzfassung**

Für Studierende an technischen und naturwissenschaftlichen Fakultäten und Universitäten ist es von zentraler Bedeutung, Mathematikkenntnisse sowie mathematische Fertigkeiten zu erlernen. Als hilfreiches Werkzeug, um diese Fertigkeiten zu beherrschen und zu trainieren, hat sich die Plattform Maple T.A.<sup>®</sup> herausgestellt. Damit können Studierende Beispiele und Übungsaufgaben in sehr großer Anzahl und Variabilität zur Verfügung gestellt werden. Dieser Beitrag soll veranschaulichen, wie Maple T.A.<sup>®</sup> an der Technischen Universität Wien im Bereich der Mathematik und Modellbildung eingesetzt wird und anschließend anhand einiger Beispiele einen kurzen Einblick in den Funktionsumfang der Software geben.

## **1 Einleitung**

Im Vorfeld des Beschlusses einer Studieneingangsphase an den österreichischen Universitäten wurden an vielen technischen und naturwissenschaftlichen Fakultäten und Universitäten Kurse angeboten, in denen die Mathematikkenntnisse der zukünftigen Studierenden aufgefrischt und gefestigt werden sollen.

An der Technischen Universität Wien wurde im Wintersemester 2008 ebenfalls so ein Auffrischkurs Mathematik für Elektrotechnik installiert und im Zuge dessen auf Unterstützung durch e-learning zurückgegriffen. Die Unterstützung besteht darin, dass die Plattform Maple T.A.<sup>®</sup> verwendet wird um den Studierenden eine Vielzahl an Beispielen zur Verfügung zu stellen. Auch ein Kenntnistest zu Beginn der Lehrveranstaltung und der Abschlusstest am Ende werden auf dieser Plattform durchgeführt. Auf diese Art und Weise wird die Präsenzlehre, bestehend aus einem Vorlesungsblock und einer Übung in Kleingruppen, mit Maple T.A.<sup>®</sup> unterstützt.

## **2 Verwendung von Maple T.A.<sup>®</sup> in der Lehre**

Im Auffrischkurs Mathematik für Elektrotechnik werden acht Themen behandelt: Rechnen mit Brüchen, Rechnen mit Termen, Elementare Funktionen 1, Elementare Funktionen 2, Differentialrechnung, Integralrechnung, Vektorrechnung und komplexe Zahlen. Zu diesen Modulen werden durch

Maple T.A.<sup>®</sup> acht korrespondierende Aufgabeneinheiten bereitgestellt, mit denen die Studierenden üben können.

Aufgrund des großen Erfolgs im Auffrischkurs wird die Unterstützung durch e-learning auch in den Übungen Mathematik 1 und 2 für Elektrotechnik eingesetzt. Das Konzept ist dasselbe wie im Auffrischkurs, die Präsenzlehre wird durch Beispiele auf der Maple T.A.<sup>®</sup>-Plattform unterstützt. In den Übungen zu Mathematik 1 für Elektrotechnik wird der Abschlusstest via Maple T.A.<sup>®</sup> abgewickelt. In den Übungen zu Mathematik 2 für Elektrotechnik werden vier Tests über das Semester verteilt gehalten, wobei wieder Beispiele durch Maple T.A.<sup>®</sup> bereitgestellt werden und der Test im Stil dieser Beispiele gehalten ist.

Im Zuge dieser Lehrveranstaltungen ist auch das Prüfen mit Maple T.A.<sup>®</sup> verifiziert worden. Es treten Schwierigkeiten hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Testbewertung und der Aufbewahrungspflicht auf. Der Aufwand, im Rahmen eines europäischen Bildungssystems, Prüfungen damit abzuwickeln ist enorm. Auf amerikanischen Universitäten wird eine Klassifikation der Studienanfänger mit diesem System durchgeführt, was, wie die Erfahrung aus dem Auffrischkurs Mathematik für Elektrotechnik zeigt, gut machbar ist. Speziell für höhere Mathematik, wie es in den Grundvorlesungen Mathematik 1 und 2 für Elektrotechnik der Fall ist, wird es komplizierter.

Ein didaktischer Aspekt ist die Vermittlung von Modellen mit der Plattform Maple T.A.<sup>®</sup>. Durch die Struktur der Plattform wird es ermöglicht, den Studierenden typische Modelle mit unterschiedlichen Parameterwerten zur Verfügung zu stellen. Die Studierenden werden auf diese Modelle, die an die mathematischen Fähigkeiten angepasst sind, geschult und dadurch im Umgang mit den Modellen und Größen vertraut gemacht.

### 3 Beispiele aus der Mathematik

Anhand von einigen typischen Beispielen, wie sie häufig in der Lehre der Mathematik vorkommen, soll nun demonstriert werden, in welcher Weise der Einsatz von Maple T.A.<sup>®</sup> die Studierenden beim Aneignen von mathematischen Fertigkeiten unterstützt.

Berechne den Grenzwert der Folge  $x_n = \frac{(6 \cdot n + 6) \cdot (20 \cdot n^2 + 15)}{(10 \cdot n^2 + 16 \cdot n) \cdot (6 \cdot n + 14)}$ .

**Hinweis:** Geben Sie das Ergebnis als Bruch oder Wurzelarstellung ein!

[Number](#)

Abbildung 1: Maple T.A. Beispiel für Grenzwertbestimmung einer Folge

Zunächst widmen wir uns einer einfachen Grenzwertaufgabe einer Folge, siehe Abbildung 1. Die Folge mit den Folgengliedern  $x_n$  ist definiert durch

$$x_n = \frac{(a_1 \cdot n + a_2)(a_3 \cdot n^2 + a_4)}{(b_1 \cdot n^2 + b_2)(b_3 \cdot n + b_4)}$$

Die Parameter  $a_i, b_i \in \mathbb{R}$  werden jeweils zufällig bestimmt, sodass der Studierende bei jedem Mal die Aufgabe mit einer anderen Angabe zu lösen hat.

Dieses Beispiel veranschaulicht die Substitutionsregel an einer zusammengesetzten Funktion  $f(g(x))$ . Die Eingabefelder sind nach dem Schema

$$\int f(g(x)) dx = \left[ \begin{array}{l} y = g(x) \\ dy = g'(x) \cdot dx \end{array} \right] = \int f(y) \cdot \frac{1}{g'(x)} dy$$

auszufüllen.

1. Die Funktion lautet:  $(x^2)^\alpha$

2. Die Substitution lautet:  $y =$     

$dy =$       $dx$

3. Das umgeformte Integral lautet:

$$\int (x^2)^\alpha dx = \int$$
      $dy$ 

**Bemerkung:** Bei einer praktischen Berechnung müsste der von  $x$  abhängige Term weggelassen werden können. Das ist hier nicht der Fall.

Abbildung 2: Abgestuftes Maple T.A. Beispiel (Integration mittels Substitution)

Eine weitere Möglichkeit besteht darin abgestufte Beispiele zu erstellen. Ein Vorteil ist hierbei, dass die Studierenden anhand von detaillierten Beschreibungen durch das gesamte Beispiel geführt werden können. Abgesehen davon müssen hier mehrere Teilergebnisse eingetragen werden. Das verhindert, dass durch einfache Rechenfehler im letzten Schritt das gesamte Beispiel als falsch gewertet werden würde. Als Beispiel einer solchen abgestuften Aufgabe wird die Integration mit Hilfe der Substitutionsregel herangezogen, siehe dazu Abbildung 2. Die Studierenden müssen hierbei zunächst die zu substituierende Funktion und anschließend im zweiten Schritt das gesamte umgeformte Integral angeben. Auch hier ist die Funktion wieder randomisiert, sodass jede Aufgabe für sich eigenständig ist.

Im dritten Beispiel soll das Erkennen von Frequenz, Amplitude und Verschiebung in einem Graphen geschult werden, siehe Abbildung 3.

Wählen Sie die richtige Funktion mit den richtigen Koeffizienten aus.

Das Bild zeigt

$b \sin(ax)+d$

$b \cos(ax)+d$

mit

$a =$

$b =$

$d =$

$(a, b, d \in \mathbb{Z})$

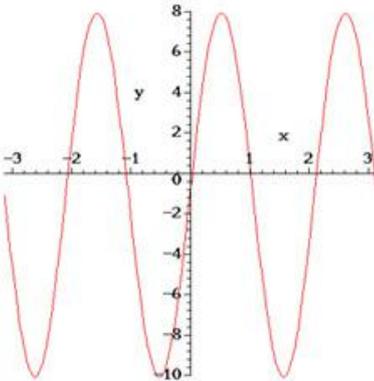


Abbildung 3: Erkennen von Amplitude, Frequenz und Verschiebung in Maple T.A.

Hier werden für Frequenz, Amplitude und Verschiebung zufällige Werte generiert und anschließend mittels Maple T.A.<sup>®</sup> der entsprechende Graph gezeichnet. Dem Studierenden obliegt es nun aus der Grafik die einzelnen Werte herauszulesen und anschließend in die dafür vorhergesehenen Felder einzutragen. Das Beispiel veranschaulicht auch die Funktionalität von Maple T.A.<sup>®</sup>, Auswahllisten für Antwortmöglichkeiten bereitzustellen. Der Studierende muss also entscheiden, ob es sich bei dem gegebenen Graphen um eine Sinus- oder Cosinus-Funktion handelt.

## 4 Modelle aus der Elektrotechnik

Maple T.A.<sup>®</sup> wird dazu verwendet, um wichtige Modelle den Studierenden der Ingenieurwissenschaften näherzubringen und vertraut zu machen. Bei der Elektrotechnik sind dies zumeist Modelle die mit elektrischen Schaltkreisen von Induktivitäten, Kapazitäten und elektrischen Widerständen.

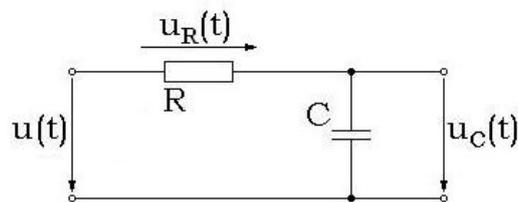


Abbildung 4: RC - Übertragungsglied

Ein Beispiel ist das eines RC-Übertragungsgliedes, wie es in Abbildung 4 zu sehen ist. Diese Schaltung kommt im Laufe des Studiums der Elektrotechnik sehr häufig in unterschiedlichen Zusammenhängen vor. Es lohnt daher in den Grundvorlesungen schon darauf zu achten, dass die Studierenden damit konfrontiert werden. Eine saubere Ableitung der zugehörigen Differentialgleichung und ein anschließendes Üben mit dem implementierten Beispiel in Maple T.A.<sup>®</sup> führt zu einem nachhaltigen Lerneffekt bei den Studierenden.

Der Ableitung liegen die Gleichungen der Bauteile zugrunde, für den elektrischen Widerstand gilt

$$u_R(t) = R \cdot i(t), \quad (1)$$

für den Kondensator mit der Kapazität  $C$  gilt

$$i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}. \quad (2)$$

Die Maschenregel nach Kirchhoff besagt, dass die Summe der orientierten Spannungen verschwindet, also gilt

$$u(t) - u_R(t) - u_C(t) = 0. \quad (3)$$

Wenn Gleichung (2) in Gleichung (1) eingesetzt und diese in die Maschengleichung (3) eingesetzt wird, so erhält man die beschreibende Differentialgleichung des RC-Gliedes. Wird das RC-Glied für den Entladevorgang untersucht, also dass  $u_C(0) = U_0$  und  $u(t) = 0$  gilt, so erhält man die Differentialgleichung

$$R \cdot C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0. \quad (4)$$

Wird diese Differentialgleichung für konkrete Werte  $R, C, U_0 \in \mathbb{R}^+$  gelöst, gelangt man darüber hinaus über den Zusammenhang

$$Q_C(t) = C \cdot u_C(t)$$

zur elektrischen Ladung des Kondensators.

Diese Aufgaben werden im implementierten Beispiel in Maple T.A.<sup>®</sup> von den Studierenden ebenfalls verlangt. Die Ableitung der Modellgleichung wird in der Präsenzlehre getätigt, respektive ist diese Ableitung als ein Übungsbeispiel in der Präsenzübung verlangt, das Lösen für verschiedene Bauteil- und Spannungswerte wird aber mit Maple T.A.<sup>®</sup> abgefragt.

Die Spannung am Kondensator eines RC-Gliedes (siehe Abbildung) genügt der Differentialgleichung

$$R \cdot C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0$$

wobei  $R \in \mathbb{R}$  den elektrischen Widerstand,  $C \in \mathbb{C}$  die Kapazität und  $u_C(t)$  die elektrische Spannung am Kondensator bezeichnet.

Zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  hat die Spannung  $u_C(t)$  den Wert  $U_0$ .

Berechnen Sie für  $R = 5 \Omega$ ,  $C = 6 \text{ F}$  und  $U_0 = 3 \text{ V}$  die elektrische Ladung  $Q_C(t)$  am Kondensator.

$Q_C(t) =$

**Hinweis:** Die elektrische Spannung und die elektrische Ladung an einem Kondensator hängen gemäß  $Q_C(t) = C \cdot u_C(t)$  zusammen.

Abbildung 5: Maple T.A.<sup>®</sup> Beispiel zum RC-Glied

Das in Maple T.A.<sup>®</sup> implementierte Beispiel ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Differentialgleichung (4) mit Bauteilwerten und einem Anfangswert ist Ausgangspunkt für das Beispiel. Die Spannungs- und Bauteilwerte werden für jeden Aufruf des Beispiels zufällig generiert. Somit ist jedes Beispiel nicht genau gleich zu seinem Vorgänger. Ziel ist es die elektrische Ladung des Kondensators zu bestimmen.

Ein weiteres - für die Elektrotechnik ausgesprochen wichtiges Beispiel - ist der RLC-Schwingkreis. Dieser tritt in der Elektrotechnik ebenfalls sehr häufig auf und die beschreibende Differentialgleichung ist eine der Standardtypen, die Studierende der Elektrotechnik sehr gut beherrschen müssen.

Die Ableitung funktioniert analog zu Abschnitt 4. Die Bauteilgleichung für die Spule mit der Induktivität  $L$  lautet

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}. \quad (5)$$

Gleichung (5) gemeinsam mit Gleichung (1), (2) und der Maschengleichung (3) führt auf die lineare Differentialgleichung

$$L \cdot C \cdot \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + R \cdot C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = u(t). \quad (6)$$

Diese Differentialgleichung soll für sinusförmige Anregung  $u(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$  mit  $A, \omega \in \mathbb{R}^+$  und Anfangswerte für  $u_C$  und  $\dot{u}_C$  untersucht werden. Das in Maple T.A.<sup>®</sup> implementierte Beispiel ist in

Ein RLC-Schwingkreis (siehe Abbildung) genügt der Differentialgleichung

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = u(t).$$

Man nehme an, dass der Schwingkreis mit einer Spannung  $u(t) = 6 \text{ V} \cdot \sin(3 \cdot t)$  angeregt wird. Die Induktivität ist  $L = 19 \text{ mH}$ , die Kapazität  $C = 19 \mu\text{F}$  und der elektrische Widerstand  $R = 92 \Omega$ . Wie groß ist die Spannung am Kondensator  $u_C(t)$  im Schwingkreis wenn  $u_C(0) = 0$  und  $\frac{du_C}{dt}(0) = 0$  gilt?

$u_C(t) =$

Abbildung 6: Maple T.A.<sup>®</sup> Beispiel zum RLC-Schwingkreis

Abbildung 6 zu sehen. Die Studierenden müssen die lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung in Abhängigkeit der Anfangs- und Bauteilwerte lösen. Das Beispiel wird bei jedem neuen Aufruf mit anderen Werten initialisiert. So erhält jeder Studierende ein eigenes Beispiel, was in Prüfungsfällen das Abschreiben verhindert und die Intuition der Studierenden, bei oftmaligen Üben, schult.

## 5 Mechanisches Modell am Beispiel eines gleitenden Pendels

Das gleitende Pendel (ein einfaches Krankatzenmodell) besteht aus einer Masse  $m_1$ , die sich entlang der x-Achse bewegen kann und einer Masse  $m_2$ , die an der ersten Masse an einem masselosen, unendlich dünnen Stab der Länge 1 befestigt ist (s. Abbildung 7. Es handelt sich um ein System mit zwei Freiheitsgraden und zwar die Translation in x-Richtung und dem Winkel  $\phi$ .

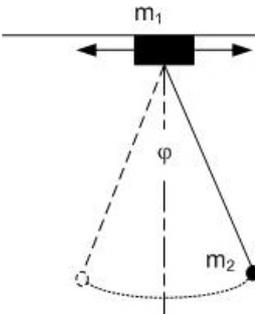
Dieses Beispiel stellt die Studierenden nur vor die Aufgabe, die partiellen Ableitungen einer Funktion zu bestimmen. Es soll für die Studierenden, die gerade am Beginn ihrer Ausbildung in mehrdimensionaler Analysis stehen, einen Einblick in die Anwendungsmöglichkeiten dieser Verfahren geben, damit sie schon frühzeitig ein Gespür für Modellbildung entwickeln können. Selbstverständlich werden auch in diesem Beispiel sämtliche Variablen per Zufallsgenerator erzeugt.

## 6 Erfahrungen beim Einsatz von Maple T.A.<sup>®</sup>

Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Maple T.A.<sup>®</sup> in den Auffrischkursen bei den Studierenden guten Anklang findet. Die Verwendung und das Üben mit dem Systems erhöhen deutlich das Vertrauen in die eigenen mathematischen Fähigkeiten. In den Auffrischkursen wurden zu Beginn und am Ende des Lehrveranstaltungsblocks jeweils Kenntnistests mit Maple T.A.<sup>®</sup> durchgeführt, und es konnte festgestellt werden, dass ein Großteil der Studierenden beim Abschlusstest besser abschnitt als zu Beginn [1]. Um zu sehen, welchen Effekt der in Abschnitt 2 erwähnte Einsatz von Maple T.A.<sup>®</sup> in weiterführenden mathematischen Lehrveranstaltungen hat, müssen noch weitere Erfahrungen in diesem Bereich gesammelt werden, um die bisher gesammelten Erkenntnisse validieren zu können.

Zweifelsfrei sind beim Einsatz der Software auch einige Probleme zu beobachten. Beispielsweise kann es teilweise sehr kompliziert werden, komplexe Beispiele der höheren Mathematik in Maple

Ein Pendel mit der Masse 5 wird über eine starre masselose Verbindung der Länge 1 an einer Aufhängung mit der Masse 3 befestigt. Diese Aufhängung besitzt einen Freiheitsgrad in horizontaler Richtung, d.h. sie kann durch die Bewegung des Pendels nach links und rechts verschoben werden. Je nach Verhältnis der beiden Massen zueinander ergibt sich so ein anderes Systemverhalten (siehe Skizze)



Es handelt sich um ein System mit zwei Freiheitsgraden und zwar die Translation in x-Richtung und den Winkel  $\varphi$ .

Als Lagrangefunktion für dieses System ergibt sich:

$$L(x, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}) = T - V =$$

$$= \frac{1}{2} 3 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} 5 (\dot{x}^2 + l^2 \dot{\varphi}^2 + 2 l \dot{x} \dot{\varphi} \cos(\varphi)) + 5 g l \cos(\varphi)$$

$$= \frac{1}{2} (3 + 5) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} 5 l^2 \dot{\varphi}^2 + 5 l \dot{x} \dot{\varphi} \cos(\varphi) + 5 g l \cos(\varphi)$$

Bestimmen Sie nun die Terme der linken Seite der Euler-Lagrange-Gleichungen:

$\frac{\partial L}{\partial x} =$    

$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} =$    

$\frac{\partial L}{\partial \varphi} =$    

$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} =$    

$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} =$    

$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} =$    

Abbildung 7: Maple T.A.<sup>®</sup> Beispiel Gleitendes Pendel

T.A.<sup>®</sup> zu implementieren. Auch birgt das Eingeben von Ergebnissen insbesondere komplexere Formeln in der Maple Syntax ein gewisses Fehlerpotential, was dazu führen kann, dass der Studierende zwar die richtige Lösung berechnen konnte, sein Ergebnis aber trotzdem als falsch gewertet wird, nur auf Grund eines einfachen Tippfehlers. Weiters ist zu bemerken, dass die Plattform in Sachen Benutzerfreundlichkeit im Bereich der Aufgabenerstellung sicher noch ein gewisses Verbesserungspotential besitzt.

### 7 Resümee

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Plattform Maple T.A.<sup>®</sup> für e-learning gestützte Lehre in den Grundvorlesungen Mathematik einige attraktive Funktionen bietet. Es besteht die Möglichkeit abgestufte Beispiele zu erstellen, mit denen Studierende geführt ein Beispiel durchlaufen können. Durch die randomisierte Beispielstruktur können sie aus einem großen Fundus an Beispielen schöpfen, wodurch die Fertigkeiten beim Bearbeiten eines Beispieltyps geschärft werden. Erfahrungen zeigen weiters, dass die Studierenden eine wesentlich niedrigere Hemmschwelle haben sich an die Beispiele heranzuwagen, da keine Bewertung in der Übungszeit stattfindet und sie sich damit in Ruhe auseinandersetzen können.

Das Kennenlernen von Modellen, hier speziell der Elektrotechnik, führt die Studenten schon während der Mathematik-Grundvorlesungen in speziellere Gebiete ihres Fachbereichs ein und stellt somit eine interdisziplinäre Brücke zwischen Mathematik und Technik her.

## 8 Literatur

- [1] *Judex F., Breitenecker F., Schneckenreither G., Zauner G.: CAS-Based E-learning for the Improvement of Refresher Courses in Mathematics. Wien: Mathmod 2009.*
- [2] *<http://www.maplesoft.com/products/mapleta/>*

# A Content Management System for E-learning in Modelling and Simulation

A.Atri<sup>1)</sup>, N.Nagele<sup>1)</sup>, N.Popper<sup>2)</sup>  
[nicole.nagele@tuwien.ac.at](mailto:nicole.nagele@tuwien.ac.at)

<sup>1)</sup> Institute for Analysis and Scientific Computing, Vienna University of Technology  
Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1050 Vienna, Austria

<sup>2)</sup> DWH – Simulation Services  
Neustiftgasse 57-59, A-1040 Vienna, Austria

## Introduction

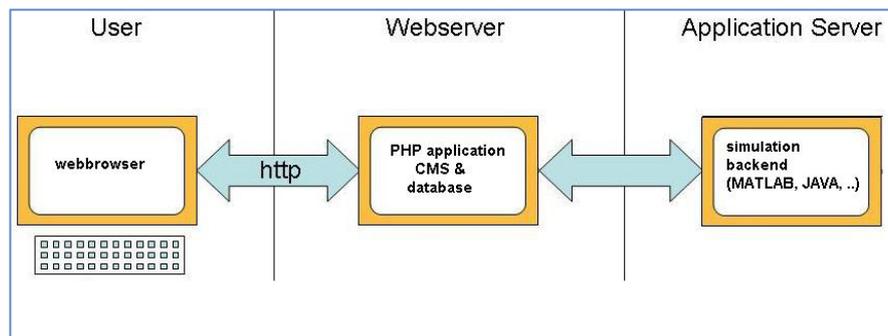
The MMT e-learning environment <sup>[1]</sup> is a web-based presentation platform used for teaching and demonstrations in classes as well as for autonomous learning and experimenting with mathematical models. MMT is an abbreviation for mathematics, modelling and tools. The demonstration examples presented on the MMT remote runtime environment are focused on the use of special methods and techniques in the field of modelling and simulation and demonstrate various kinds of rather basic mathematical operations. Currently all of the demonstration examples are implemented in MATLAB <sup>[2]</sup>.

The MATLAB source code of the programs is available for the students and can serve as basis for an introduction to the programming language. Furthermore the mathematical basics and techniques of modeling and their implementation are presented and explained textually and graphically. The administrative backend of the system has recently been adapted and reworked to a content management system, called MMT CMS. The rapidly growing example collection and the increasing number of system users was the main motivation for a far-reaching redesign of the existing system. The use content management practices facilitate and simplify the administration and use of the MMT platform for both teachers and students. In addition to that it is technically also possible to implement future demonstration examples with other server-based programming languages, for instance server-side JAVA <sup>[3]</sup> or Octave <sup>[4]</sup> instead of MATLAB.

The decision to use primarily MATLAB was taken back in 2006 when the prototype of the MMT e-learning system was designed.<sup>[5]</sup> The MATLAB software is not only a computer algebra package, but has additional tools for symbolic computation and it is wide spread in industry and research. Besides MATLAB there are several other languages present in the area of mathematical modelling and simulation Therefore the system should be opened for other common simulation and programming languages in current

development stages. Nevertheless the system should stay server-based, without system- or software-requirements on the client-side. Students should be able to use the system on every system without installing additional software. Therefore only server-based programming languages or implementations should be integrated, e.g. MATLAB, MAPLE [6], OCTAVE examples being executed on the server environment, or server-based JAVA applets.

## MMT System Structure

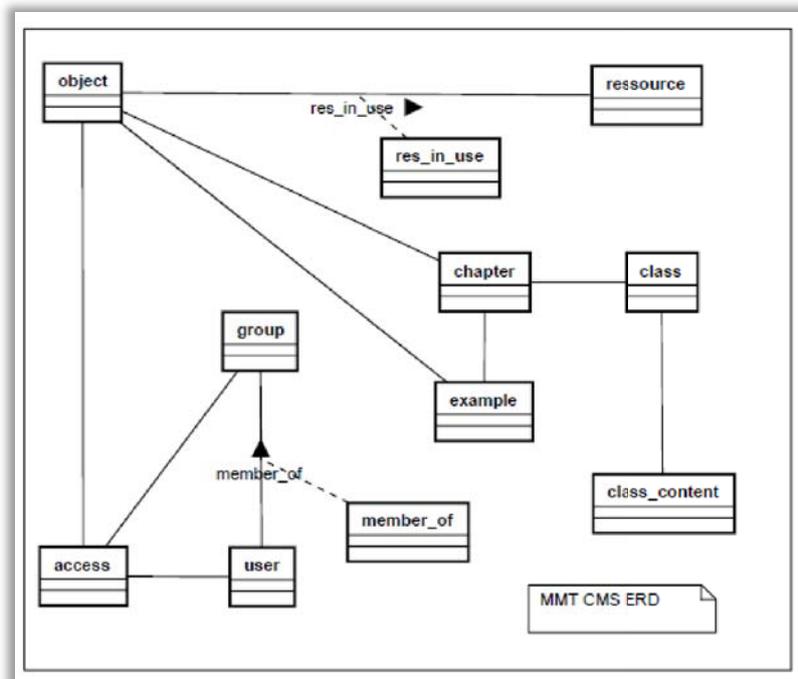


Picture 1: CMS – Modules / Backend Overview [1]

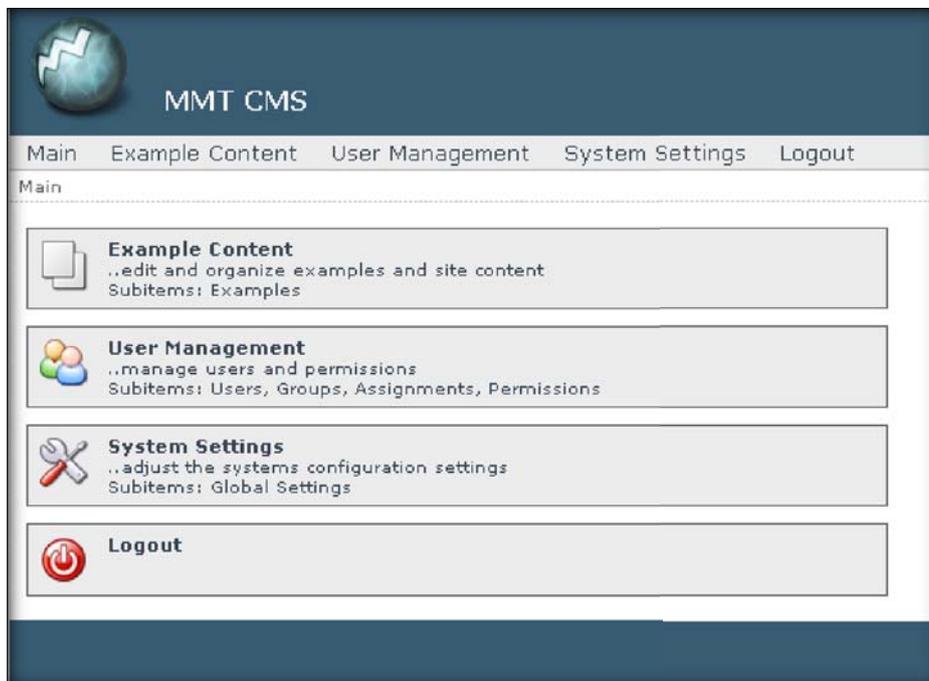
## MMT CMS Implementation

The MMT content management system is programmed in PHP [7] with a relational database backend. Due to the use of an abstraction layer for the database component the database backend can be as well MySQL [8], PostgreSQL [9] or other database types depending on existing infrastructure and system requirements. As database abstraction layer module the ADODB [10] library release 5.09 has been used. The integrated ADODB module works with PHP 4 and newer versions and supports a large number of database types. The database model consists of following tables:

- User (usr) .... stores information about system users
- Group (grp)...holds information about user groups
- Member (member)... assignement between users and groups
- Object (obj) .....data objects, generalization of chapters and examples
- Access\_Control\_User (acu) .....access control and permissions
- Access\_Control\_Group (acg) ...group-based permissions
- Ressource\_in\_Use (res\_in\_use) ... references btw. ressources and objects
- Ressource (res) ..... resources like links and pictures used by examples
- Chapter (chapter) .... collection of examples
- Example (exa) ..... demonstration examples
- Class (class) .....class or course data
- Class\_Content (clc)... chapters and examples, assigned to classes



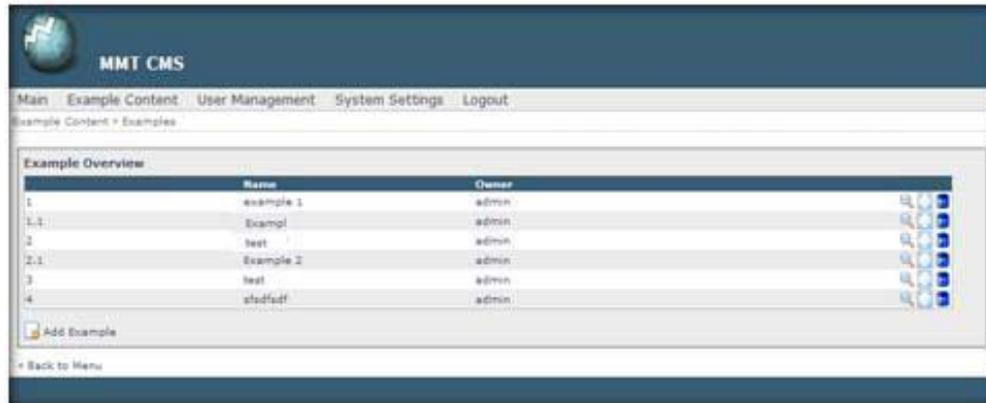
Picture 2: MMT CMS Data Model



Picture 2: CMS – Modules / Backend Overview

## Module Example Organization

The demonstration examples are organised in a tree-like data structure, and can be grouped into categories. Categories are user-defined views which represent courses and classes or types of similar examples.



**Picture 3:** Example Overview Backend

Up to now the MMT e-learning system contained solely the example information; the lecture details and schedules were managed via an external and separated management system. The adopted MMT CMS data model also contains information about lecture classes and course modules: It is possible to store information regarding lectures within the model and assign chapters and examples to courses. This gives administrative users the possibility to sort and organize chapters and examples according to lecture schedules directly within one homogenous system. Previously this had to be tracked and documented outside the system, via a separate management tools. A course management tool wide-spread for this purpose at the Vienna University of Technology is the so-called TUWEL <sup>[12]</sup> platform which is a Moodle-based <sup>[13]</sup> content management software, for managing lectures and lecture schedules. <sup>[14]</sup>

## User and Group Management

The MMT CMS provides a hierarchically organized user-management and access control. The system differs between frontend users, e.g. student and course users, and administrative users, which manage courses and examples and have therefore backend access. Source code files can be edited online via the CMS's backend user interface. Student and course users can view and download the examples' source code files via the frontend GUI. Users can be assigned to groups. Access and editing permissions can be set for groups as well as for single users.

## Editing, Uploading and Source Code Accessibility

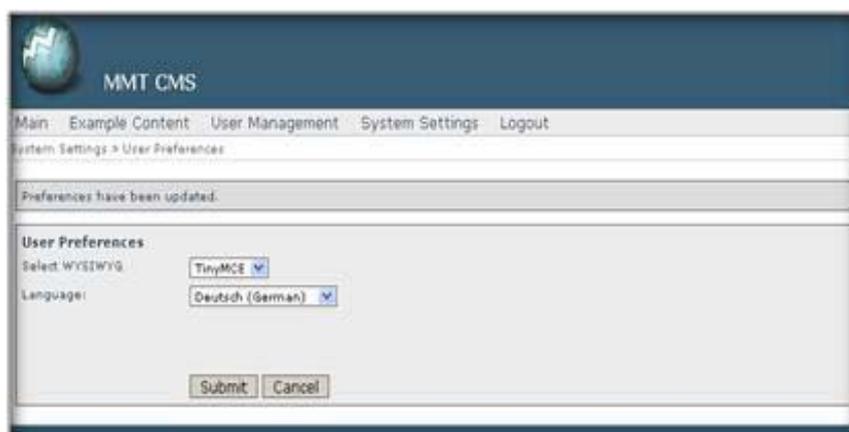
The users can select between plain text input fields and a rich text editing module. The editing mode can be selected via the system settings section. For rich text editing an adopted and simplified TinyMCE plugin <sup>[11]</sup> has been integrated into the MMT system. The TinyMCE Editor (*picture 4*) is an intuitive input interface, which provides graphical visualization and predefined buttons for the most common formatting options, e.g. bold, adjustment, font size, inserting links or picture resources. Example source code can be downloaded and uploaded via text files or edited and modified online via an input text area.



Picture 4: TinyMCE options and button men

## System Settings

Language support is realized within the backend by the use of language files which contain the predefined tags and the corresponding translation. The preferred default language is initially taken from the user's browser session. The users can easily adjust their default language within the system settings. Currently English and German language support is provided by the CMS backend. It is planned to provide language support for the example descriptions and the frontend view to make it easier usable for non-German speaking students. In the settings section users can select their preferred editing mode (plain text or rich text), switch the language preferences and change their own user details.



Picture 1: CMS – Users System Setting

## Conclusions and Outlook

Since starting the e-learning project with MATLAB at Vienna University of Technology in 2006 about 400 e-learning examples dealing with mathematics, numerical algorithms and simulation organised in more than 40 chapters have been implemented<sup>[5]</sup> They are now part of the lecture structure in mathematics for surveying and mapping as in the advanced lectures in modelling and simulation of dynamical systems. The MMT e-learning environment is used to explain numerical problems, computer numeric, as well as how to implement dynamical problems (ARGESIM benchmarks and comparisons mechanical or physiological problems) and SIMULINK examples.

An important improvement of the MMT content management system is the simplification of example handling and user administration. In addition to that it is now technically also possible to implement future demonstration examples with other server-based programming languages, for instance server-side JAVA or Octave instead of MATLAB. Another advantage is that MMT system now stores information about courses and lecture schedules too. This feature improves the systems usability by keeping all relevant information together at one place for both student and administrative users.

Recently the backend MATLAB engine was upgraded from MATLAB 7.2 web server to a normal MATLAB 7.8 engine. Along with this change the server hardware was improved to a server system with four CPU cores. This allows starting more parallel MATLAB instances and increased the systems performance.

Current work in progress and planned developments are the integration of the existing example collection in the database-based MMT CMS, the implementation of language support in the MMT CMS frontend and the possible integration of additional server-based programming languages for the examples into the system. A drawback of the system is its limitation regarding the output features: At present example results are solely presented as textual output, pictures and diagrams. Therefore a further planned enhancement is the integration of animated pictures and videos to broaden the presentation possibilities.

## References and Literature

- [1] [F. Judex](#), G. Zauner, [F. Breitenecker](#): "*Introducing MATLAB into Basic Mathematic Lectures Using a Custom E-Learning System*"; in: "*Proceedings of the ITI 2008 30th Int. Conf. on Information Technology Interfaces*", V. Luzar - Stiffler, V. Hljuz Dobric, Z. Bekic (Hrg.); ISBN: 978-953-7138-13-4; S. 209 - 214.
- [2] MATLAB environment: <http://www.mathworks.com>
- [3] JAVA programming language: <http://www.java.com>
- [4] Octave/ GNU Octave language: <http://www.gnu.org/software/octave>

- [5] [F. Judex](#), B. Hametner, [F. Breitenecker](#):  
"E-Learning mit MATLAB in Mathematik Grundvorlesungen"; in: "4. ASIM-  
Workshop Wismar Modellierung, Regelung und Simulation in Automotive und  
Prozessautomation", C. Deatcu, P. Dünow, T. Pawletta, S. Pawletta (Hrg.);  
ARGESIM Report / ARGESIM Vienna, 35 (2008), ISBN: 978-3901608-33-9
- [6] MAPLE: <http://www.maplesoft.com/>
- [7] PHP hypertext preprocessor: [http:// www.php.net](http://www.php.net)
- [8] MySQL database engine: <http://www.mysql.de>
- [9] PostgreSQL database environment: <http://www.postgresql.org>
- [10] ADODB project: <http://adodb.sourceforge.net/>
- [11] TinyMCE Editor: <http://tinymce.moxiecode.com/>
- [12] TUWEL: <https://tuwel.tuwien.ac.at>
- [13] Moodle: <http://moodle.org/>
- [14] Kay Hoeksema, Markus Kuhn: *Unterrichten mit Moodle. Praktische  
Einführung in das E-Teaching*. Open Source Press, 2008, [ISBN 978-3-9375-1458-1](#).

# Modeling Actor-Specific Learning Processes on Micro-Level for Evaluations in E-Learning Environments

Jochen Wittmann, Simon Hess  
*wittmann@informatik.uni-hamburg.de*  
*University of Hamburg, Germany*  
Faculty of Informatics, Vogt-Kölln-Str. 30, 22527 Hamburg

## Abstract

This contribution focuses on evaluation within e-learning systems. It criticizes the common ex post evaluations on the level of courses and even learning environments. These evaluations are not targeted to the needs of the actors within a learning community. Therefore, the first step is to specify action roles and their individual demands concerning the significance of the evaluation. The generated list of desired results is the base for a close grained and actor-specific evaluation system. The structure of such a system is specified and the main objects are defined formally. The transfer of the abstract objects of the common evaluation system to the objects within an e-learning community is made. Finally, possible disadvantages are discussed in relation to the power of the approach, sketched by a list of possible extensions.

## 1. Introduction

With the enduring distribution and application of E-Learning services, the users become more and more aware of qualities and attributes of E-Learning solutions [1],[2],[3]. With its' great opportunity to make learning at any place and any time possible, E-Learning generates geographically wide spread learning communities with a growing understanding and demands of E-Learning (e.g. [4], [5]). A basic demand of learners is to learn content which is most appropriate for them. Evaluation and ratings for online learning material are usually used to support such decisions.

Because of sophisticated E-Learning environments are more than simple learning of content pieces, other entities have to be considered in an evaluation and rating process. Especially the existence of different actor types (e.g. EML-approach in [6] or an approach with emphasis on editorial aspects in [7]) in an e-learning application results in different expectations about the usability of ratings. For example, learners expect information about a whole course; how clear and comprehensible it is or how much time is needed. Content authors, on the other hand, are interested in single concrete learning objects, that are hard to understand for learners.

In most conventional learning systems user evaluations and ratings are already used by end-of-course surveys. This approach comes at the cost of an user evaluation which is decoupled from the original learning process. A disadvantage is that the user evaluation is given outside of the learning process. E.g. the learner won't reconsider some problems or

difficulties with single learning objects or course steps during evaluation after the completion of the whole course. With a process accompanying evaluation it would be easy for learners to note difficulties on the spot. The gathered data would reflect a detailed impression of problems during a learner's or course's learning process. As consequence it is easier to retrieve and provide information for the various acting roles according to their diverse demands and interests.

## 2. Actor specific view on evaluation

In e-Learning environments the granularity of the content is given by the granularity of learning objects [8], [9]. Against the background of a close-grained user evaluation this means, that the smallest possible cross point for evaluation is given by the learning objects' granularity too. It shifts the point of time where evaluation data is collected into the learning process and context. In contradiction to a conventional end-of-course evaluation, where the given valuation generally refer to the whole course, the learner additionally is able to give individual learning object dependant valuation information.

In the common understanding of e-learning applications two roles of users are identified: On the one hand there is the important group of *learners*, who appear as consumers of learning content and/or services. And on the other hand, the group of users authoring and using content in the sense of producers in an e-learning environment. This paper extends this intuitive approach with a refinement of the producing user group regarding the intention, demands and requirements in e-learning context.

Especially for the topic of user evaluation it has to be cleared out, that even these non-learner roles have a vivid interest in make use of user evaluation data. But in contradiction to learners the expectation about the conclusion of data retrieval might be a complete different. The following will show that the various expectations about the use of valuation data requests that evaluation is not only done by learners. E.g. a user, who created a coursework, could valuate integrated learning objects. These data could serve as an effective decision support for other course creator, who wants to reuse learning objects.

The next paragraph introduces the acting roles on which this paper relies and explains the means and expectations of evaluation for them.

### 2.1 Acting roles

The most important role in an e-Learning environment is the *learner*. Learners are usually interested in a learning process, in which they can acquire knowledge fast, easy and with less effort. Thereby the content should be clear, comprehensible and not too uninspiring, which means a kind of fun while learning. These criteria reflect that learners expect conclusion about the learning path and learning success in due proportion to the learning effort as result of querying valuation data. This data bases on subjective evaluation input of learners.

In a coursework e-Learning environment a *course author* administers courses. Available learning material denoted as learning objects has to be selected and structured

in a course. Expectations to valuation data of a course author can be divided into three categories:

- A course author wants to know how learners like the course (his product). This is based on subjective learner data, and generates feedback from learners to the course author.
- Objective data, usually measured by the e-Learning environment, in the sense of objective learning success or learning behavior. E.g. test results.
- Third, valuation of other course authors is interesting for reviews or new creation of assembled learning objects.

Recapitulating the expectation of course authors to valuation data shows, that they demand information of how their course, seen as product, is accepted. On the other hand, they want information of the learning behavior inside their course.

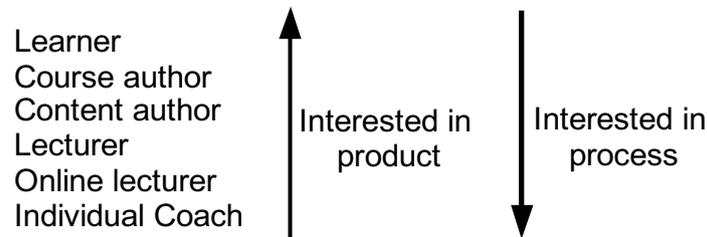
The *content author* creates single content pieces/learning objects which are assembled into courses by course authors. Content authors have similar expectations to data retrieval of evaluation like course authors. The difference is that they focus on learning object level and are interested in the improvement of learning object in the learning process. (Even system generated information like use- and time-count of assembled learning objects are relevant.)

In a blended learning environment the *lecturers* arrange the presence phase of a course. Knowing actual problems and status of learning processes could give lecturers a vivid impression of accumulated problems of learners. Thus lecturers expect by the means of evaluation result input from learners for a common overview of the status of individual learning processes. It leads to better balanced goal-oriented teachings to learners by the lecturers. As valuator the lecturer, in contradiction to the learner, is able to give more qualified data about the usability of content (learning objects) in his lessons and learning process.

*Coaches* are integrated in the learning process; they accompany courses online and help learners with upcoming problems. An in-depth view divides coaches into *online lecturers* and *individual coaches*. Online lecturers teach and comment, usually with the help of a communication module, the courses' learning objects to learners. Individual coaches are highly qualified to answer individual learner questions. By their closeness to learners an e-Learning environment can make use of coaches in two ways regarding evaluation: As professionals, coaches can review the valuation of learners about specific learning objects and turn in a qualified statement to the bone of contention. Thus, they generate very interesting data for content authors and provide information about the flow of the learning process to the course author. Second, coaches anticipate problems of learners by reviewing given valuation.

The introduced acting roles and their expectations to user evaluation in e-learning environments show two main interests of user groups. One interest is to gather information about the learning process. With such knowledge coaches for example can effectively improve their teachings. The other interest is to get clear information about the product of an e-learning service. For example Learners don't want to hear long lines of how good and didactical valuable a course is. They want to know short facts, like the

needed time effort and prerequisites, instead. Figure 1. shows the two interests arrow-ordered to mark the relevance for specific roles.



**Figure 1.** Interests of acting roles

### 3. Structure of the system

#### 3.1. Overview

The term “evaluation system” will get completely different semantics if its specification is based on the specific demands of the acting roles elaborated in section two. Figure 2 gives an overview over the structure of such a demand driven evaluation. For the example of the learning process the collection of evaluation data is depicted.

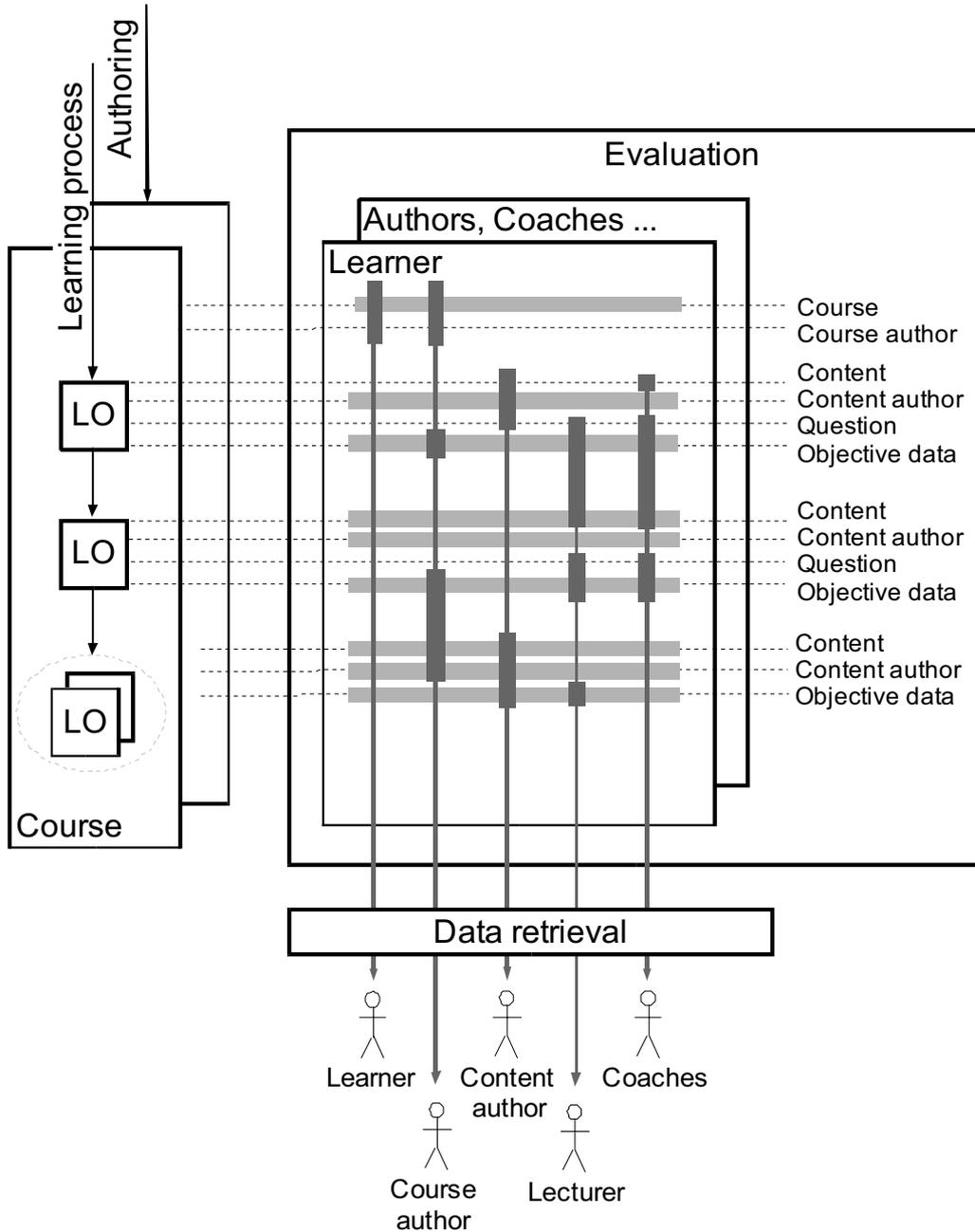
The selection of the learning process leads to the first characteristic difference to other systems: evaluations are gathered synchronously with the currently running actions within the learning system. This implies that the actors and their current states within the process are known. This fact allows to store additional semantical information automatically by the system. Obviously, this leads to a much more detailed and individualized data collection without any additional efforts for the users. The users task should be focused on giving information on subjective, i.e. evaluation level. Here we recognize the second difference to other evaluation systems: The currently active actor is encouraged to give evaluations on the spot for close-grained learning objects. These evaluations should concern

- a) the content object itself (evaluation type “content” in figure 2),
- b) the author of the learning object, and
- c) questions, remarks for other actors concerning exactly the currently evaluated learning object.

Doing so, in the evaluation data base a large set of data entries are collected that are user specific and close grained concerning the scale of learning objects and the type of evaluation. Only with such an objective oriented data collection in the data repository an action role specific evaluation becomes possible.

In analogy to the input side there has to be a role specific differentiation on the output side of the evaluation system, too. That implies role specific access to the evaluation entries by statistical methods. Because these methods can rely to the original raw data collected, a purposeful and efficient statistical analysis can be implemented.

Figure 2 shows the proposed proceeding by the example of the learning process. An analogue evaluation of close grained process steps might be realized for other processes within the learning environment, too.



**Figure 2.** Example for evaluation collection and data retrieval processes

### 3.2. Definition

Figure 2 may give an overview over the basic idea of a general evaluation system. In the center we recognize a set of evaluations. Two processes access these data. On input side the evaluation collecting process and on the output side the statistical evaluation of the evaluation set together with the presentation of the evaluation result.

Following this alternative of definition, the process for gathering evaluations and the process of statistical evaluation of the gathered data are highly flexible and scalable. They will depend more or less on the demands growing up with the e-learning scenario chosen. Here we shall concentrate on general features and see the central role of the object "evaluation". In Completion to the definitions in [10], evaluation is defined formally as a tuple

$E := (t, \text{eval\_obj}, \text{evaluator}, \text{eval\_attr}, \text{eval\_value})$   
with

timestamp	t
evaluated object	eval_obj
evaluator id and role	evaluator
evaluated attribute	eval_attr
value of the eval_attr	eval_value.

Some remarks to this approach of definition:

- It is highly scalable concerning the set of evaluated objects.
- It makes no difference between natural persons and system objects: both may be evaluated by the same scheme.
- Persons may be evaluators in one evaluation entry but evaluated object in another.
- The role of an evaluator is not restricted to natural persons; evaluation entries may be collected automatically by the evaluation system.
- The "time" entry allows new features in analysis , such as changing evaluations in time for certain evaluated objects, the forgetting of older evaluations, ...

We learn from this definition the evaluation tuple as a basic data object independent of the data collection processes and the further evaluation processes. However, this flexibility has its price: the very easy evaluation entries have to be processed to derive a statistically significant value for the users of the evaluation system.

### 3.3. Extensions of the definition

The basic definition introduced so far may be criticized in two points that have to be discussed:

Firstly: due to the basic data format of an evaluation, aggregated statements about an evaluated object are not possible. First example: The value for *reliability* of a person

might be a weighted combination of the basic evaluation attributes *number of correct answers* and *response time*.. Second example: An object is assembled from n separately evaluated components; how to derive the evaluation attribute and its value for such an aggregation?

Secondly: The statistical treatment of the measurements might be arbitrarily complex and elaborated. Example: Finding correlations between evaluators and their evaluations and normalizing the statistical results according to the correlation value.

The second point concerning the statistics is only apparently a problem. All the necessary operations can and should be realized within the evaluation output processes. According to the definition, these processes base on evaluation entries only and these data are exactly those, the statistical routines will need.

The first argument concerning aggregated evaluation object hierarchies demands some more consideration. The problem lies in the fact, that objects shall be evaluated which are not necessarily elements of the set of evaluated objects. But we know a rule to derive an object attribute value by reconstructing the relations between the interesting object and the evaluated ones in the stored entry tuples. However, the evaluation system should know the relations between the objects (normally given by ontology or by a kind of UML-diagram), the weights for the different contribution in respect of the aggregated result, and the calculation function (or rule) to calculate the desired value. So, the definition has to be extended by these three elements: a set of objects, that are not evaluated directly, and a set of mappings for deriving and calculating aggregated object attribute values. There is no place here to formulate these extensions formally, but it will be easily to see, that such an extension will cause nor problems neither inconsistencies.

#### 4. Evaluation system in e-learning context

With these definitions as a theoretical background together with the action roles discussed in the beginning the transfer of evaluation systems to the context of e-learning becomes quite easy. To define an evaluation system the mapping between the objects of the definition and the objects of the application field has to be done.

**Evaluated objects:** To start, we can refer to the standardized learning objects from the LOM standard. But there are desirable extensions such as software technological aspects such as elements of the graphical user interface, the handling of special functions and so on. If we assume an object oriented software concept, each of the objects defined there that is visible for the users is candidate for the set of evaluated objects. Obviously, all the participating persons have should be added (learners, teachers/tutors, authors). It has to be considered, that these persons act in different roles, a fact, that demands differentiation for evaluation, too. This would be a further example for aggregated evaluations: Is it possible to give a function to derive an aggregated quality-value for a natural person that acts within the learning system in different roles?

**Evaluators:** Standard setting for this set will be the role-keeper already mentioned. They may evaluate learning objects as well as other actors may be even themselves. Such reflections on the own learning process may offer some hints for other users to value the evaluations of an other person (in analogy to the ideas of a web of trust). A main

advantage of the so defined evaluation system is the possible extension of the set of evaluators to automatically working evaluation collecting processes: All timed criteria such as reply-time of tutors, holding of deadlines for housework, ..., can be observed and stored to the evaluation data set by system functions. Tests results may be added automatically and contribute to an objective evaluation of test-objects as well as of tested objects.

**Evaluated attributes:** The evaluated attributes are free definable in dependence on the intention of the further statistical processing.

**Evaluation processes:** There are two types of processes: the data gathering ones and the data processing ones. Data gathering is done interactively by the users of the system in connection with their work on the evaluated objects. They just have to fill the evaluation entries. The automatically working evaluators are processes which are started with the very start of the learning system. They observe their conditions for data collection and write the corresponding observations directly to the evaluation data set. Both may be seen as “observers”, that run independently and autonomously of the observed learning process.

The specification of the data evaluating processes is more complicated. Normally, they will be standard statistical functions working on the set of evaluation entries. Easy to use and to interpret are the methods of descriptive statistics. They can be overtaken from standard libraries without substantial changes. More sophisticated considerations will be necessary for evaluations based on statistical hypotheses and their corresponding tests. These functionalities must be developed separately for each of the evaluation hypotheses. The basic evaluation data is sufficient for all these tests and the statistical procedures offer wide adaptability. However, all evaluations should be carefully integrated in regard to the interpretation of their results. The corresponding statistical preconditions must be kept, a fact that implies strong guided execution of any statistical evaluation even if it would be technically easy to give a highly generic tool to the user.

## 5. Conclusion

The approach of this paper specifies a framework to implement close-grained evaluations for actors involved in learning and authoring processes. It shows a highly adaptable system structure in comparison to standard approaches done by static and mostly ex post user surveys. This might lead to some problems, that only can be sketched here: The continuous evaluation during the learning process implies the danger of distracting the learners from learning by doing to much evaluation or rating. The amount of data asked and the method of asking have to be appropriate to both: the evaluating and – obviously! – the learning.

The second concluding remark is a very simple observation: All the statistical analysis of the evaluation entries will become more elaborated and difficult, because it has to be oriented to concretely specified questions and demands for each of the action roles and has to offer exactly the fitting statistical method. A more or less evaluation ex post “in general” will not be sufficient any more!

The final remark refers to the idea of a network of evaluating and being evaluated actors. This sight to the situation suggests a useful transfer and application of the ideas coming up from collaborative filtering to the e-learning area to get reliable and creditable evaluations within a learning community.

## 6. References

- [1] Simon, B., E-Learning an Hochschulen, Eul-Verlag, Lohmar 2001
- [2] Schulmeister, R.: Lernplattformen für das virtuelle Lernen. Evaluation und Didaktik Oldenbourg, München 2003
- [3] Baumgartner, P.; Häfele, H.; Maier-Häfele, K.: E-Learning Praxishandbuch. Studienverlag, Innsbruck, 2002
- [4] Koper E.J.R., Increasing Learner Retention in a Simulated Learning Network Using Indirect Social Interaction, Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 8, no. 2
- [5] Duval, E., A Learning Object Manifesto, in: Proc. of the e-learning conference 2005, Brussels, pp.113-118
- [6] Koper E.J.R. and Olivier B., Representing the Learning Design of Units of Learning. Educational Technology & Society, 7 (3), pp. 97-111.
- [7] Bergstedt, S. et al., Content Management Systems and e-Learning-Systems–A Symbiosis? in: Devedzic, V. et al. (Eds.): Proc. 3rd IEEE Intern. Conf. on Advanced Learning Technologies (ICALT), Athens 2003, Los Alamitos 2003, pp. 155-159
- [8] IEEE WG12 Learning Object Metadata <http://ltsc.ieee.org/wg12/>
- [9] ARIADNE: <http://www.ariadne-eu.org/>
- [10] Wittmann, J., About the Integration of Didactics in an Individualized E-Learning Environment, in: Kinshuk et.al. (Eds.): Proc. 4th IEEE Intern. Conf. on Advanced Learning Technologies, ICALT, Los Alamitos 2004, pp. 116-120

# Topologieoptimierung von rekurrenten Neuronalen Netzen mit Featurevektoren variabler Länge mittels Genetischen Algorithmen

Michaela Fazekas, Matthias Wastian, Michael Gyimesi und Felix Breitenacker  
michaela.fazekas@aon.at, matwaste@gmx.at,  
michael.gyimesi@tuwien.ac.at, felix.breitenacker@tuwien.ac.at  
TU Wien, Austria

## Motivation

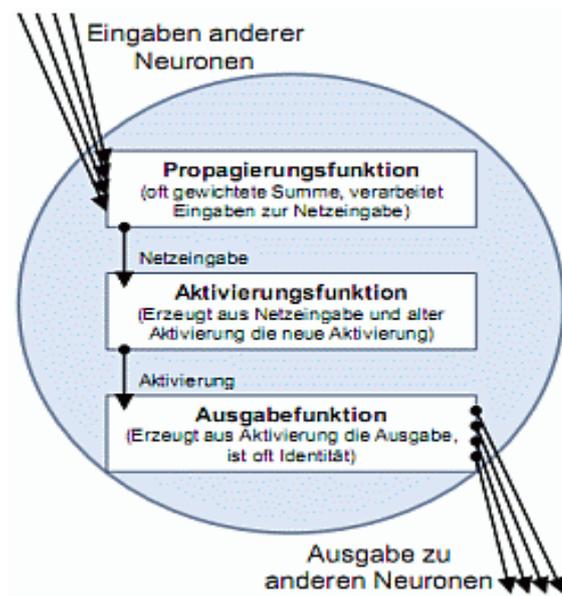
In der Qualitätskontrolle werden die erzeugten Produkte oft einer optischen Sichtprüfung unterzogen. Ein menschlicher Experte entscheidet, ob die sichtbaren Fehler tolerierbar sind oder ob das Produkt Ausschussware ist. Diese Klassifizierung in *gut* und *schlecht* beruht auf (zum Teil nur implizit) definierten Regeln. Das Produkt wird fotografiert und durch einen Vergleich mit dem Bild eines als optimal angenommenen Produkts werden die einzelnen Abweichungen registriert. Jedem dieser Fehler werden die gleichen Eigenschaften (Features) zugeordnet, z.B. Lage, Ausdehnung, Graustufung etc., die in einem Featurevektor zusammengefasst werden. Anhand dieser Vektoren soll eine automatisierte Klassifikationsmethode entscheiden, ob das Produkt in Ordnung ist oder nicht. Eine der großen Herausforderungen hierbei ist die variable Anzahl an registrierten Fehlern pro produziertem Stück.

## 1 Einleitung

### 1.1 Eine sehr kurze Einführung in Neuronale Netze

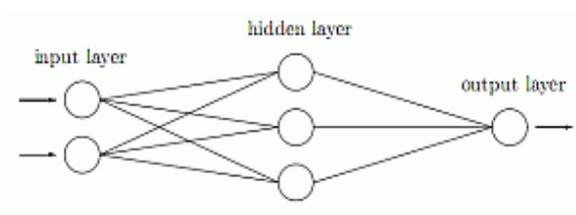
Das Funktionsprinzip eines Neuronalen Netzes ist dem des menschlichen Gehirns nachempfunden. Das Netz besteht aus einer Knotenmenge (Unit- oder auch Neuronenmenge genannt) und den Verbindungen zwischen den Knoten. Die Synapsenstärke, d.h. die Stärke einer Verbindung zwischen zwei Neuronen wird durch ein Gewicht (eine reelle Zahl) repräsentiert. Die Verarbeitung der einkommenden Signale eines Neurons erfolgt in der Modellierung eines Neuronalen Netzes in drei Schritten (siehe Bild 1; [4]): Die eingehenden Signale werden durch eine Propagierungsfunktion in einem Wert, dem sogenannten 'netinput', zusammengefasst. Häufig wird hier das Skalarprodukt aus den Outputs der vorhergehenden Neuronen und den dazwischen liegenden Gewichten verwendet. Die nachfolgende Aktivierung durch die Aktivierungsfunktion beschreibt den Aktivierungsgrad eines Neurons aufgrund des netinputs und entspricht der Feuerrate eines Neurons im menschlichem Gehirn. Zum Schluss wird aus dem Aktivierungslevel der Output des Neurons ermittelt. In der Praxis entspricht diese Outputfunktion meist einfach der Identitätsfunktion.

Die Neuronen werden in sogenannten Layern, zu Deutsch Schichten, gruppiert. Neuronen, die sich im selben Layer befinden, werden zum gleichen Zeitschritt bearbeitet. Ein solches Netz wird ein Perzeptron genannt. Die Layer werden grob nach drei Arten unterschieden: Im Input-Layer befinden sich die Input-Neuronen des Neuronalen Netzes, im Output-Layer logischerweise die Output-Neuronen des Neuronalen Netzes. Dazwischen liegen die sogenannten Hidden-Layer, die für interne Berechnungen zuständig und daher nach außen nicht sichtbar sind. In diesem Sinn kann man Modelle mit Neuronalen Netzen also als Black-Box-Modelle verstehen.



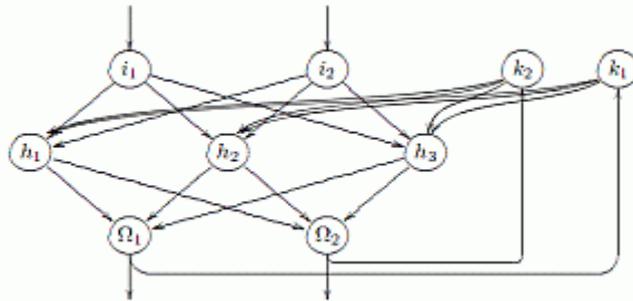
**Bild 1:** Verarbeitung einkommender Signale eines Neuronen Netzes.

Weiters wird zwischen Feedforward-Netzen und rekurrenten Neuronalen Netzen (RNN) unterschieden. In Feedforward-Netzen wird der Input Schicht für Schicht, also vom Input-Layer über die Hidden-Layer und schließlich zum Output-Layer, propagiert. Zu jedem Zeitpunkt wird für die Neuronen eines Layers aus dem Netinput, welcher sich aus den Daten des vorhergehenden Layers ergibt (siehe Bild 2), der Output der Neuronen dieses Layers berechnet.



**Bild 2:** Schematische Darstellung eines Feedforward-Netzes.

In rekurrenten Neuronalen Netzen (Bild 3) gibt es zusätzlich Rückkopplungen. Der Output eines Neurons kann Input eines Neurons in einem vorhergehenden Layer sein. Ein solches Neuron wird auch als Kontext-Unit bezeichnet. Meist wird der Output-Wert des Neurons eins zu eins vom Kontext-Neuron übernommen. Lediglich über die Gewichte, welche vom Kontext-Neuron wegführen, gibt es eine Änderung des rückgekoppelten Wertes.



**Bild 3:** Schematische Darstellung eines rekurrenten Netzes.

## 1.2 Eine sehr kurze Einführung in Genetische Algorithmen

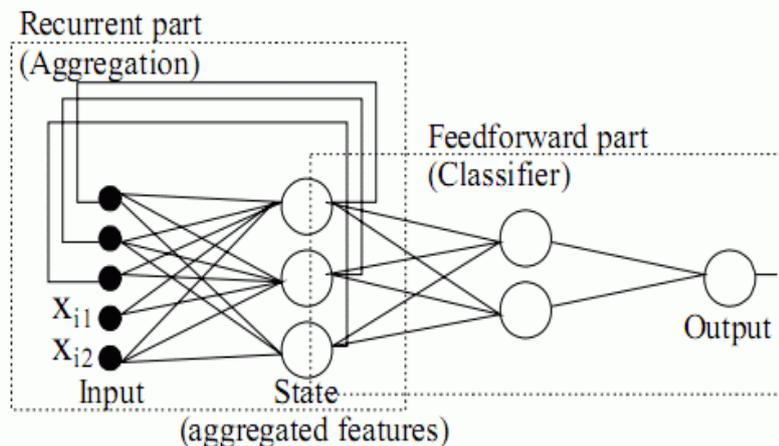
Genetische Algorithmen sind stochastische Suchverfahren. Die Parameter einer zu optimierenden Zielfunktion (auch Fitnessfunktion genannt) werden als Gene zusammengefasst und repräsentieren ein Individuum in der Population. Durch Selektion, Mutation und Rekombination erfolgt eine schrittweise Veränderung der Parameter, sodass die Fitness der Individuen im Schnitt in fortschreitender Generationenfolge immer besser wird. Ein konvergierender Algorithmus liefert eine Population aus lauter gleichen Individuen.

## 1.3 Überblick über die Untersuchungen

Gegenstand der präsentierten Untersuchungen ist der Entwurf eines rückgekoppelten oder rekurrenten Neuronalen Netzes (RNN), welches aus einer variablen Anzahl von zu einem Objekt gehörenden Inputvektoren zunächst eine Klassifikationsfunktion wie beispielsweise  $\min_{i,j,i \neq j} |x_i - y_j| \leq \nu$  mit zufriedenstellender Genauigkeit lernen und anhand dieser das Objekt klassifizieren soll. Der Entwurf der Struktur solcher RNN ist nicht systematisch möglich. Es liegt nahe, durch die Verwendung von Genetischen Algorithmen ein systematisches Vorgehen beim Entwurf der Topologie eines solchen RNN zu versuchen.

Der linke Teil des in Bild 4 dargestellten RNN erfüllt die Aufgabe der Aggregation und benötigt Rückkopplungen, um mit der unterschiedlichen Anzahl von Featurevektoren als Input umgehen zu können. Dahingegen stellen die anschließenden Schichten für sich betrachtet ein klassisches Feedforward-Netz ohne Rückkopplungen dar, das im Wesentlichen die Aufgabe der Klassifikation übernimmt. Der Output-Layer soll aus einer Unit bestehen, die etwa die Qualität des klassifizierten Produkts ausgibt; ebenso wird die An-

zahl der Input-Units als fixe Größe betrachtet. Alle anderen Teile des RNN – wie die Anzahl der Neuronen pro Schicht, die Verknüpfungen der Neuronen untereinander, etc. – werden als potentiell zu optimierende Bestandteile des Netzes angesehen und nach und nach mit Hilfe von genetischen Algorithmen adjustiert.



**Bild 4:** Schematische Darstellung eines RNN zur Aggregation mit Rückkopplungen.

## 2 Ein Ansatz

Wie oben beschrieben wird ein Genetischer Algorithmus verwendet, um eine möglichst gute Topologie eines rekurrenten Neuronalen Netzes zu einer bestimmten Aufgabenstellung zu finden. Ziel ist es, dass ein rekurrentes Neuronales Netz bei einer jedes Mal unterschiedlich großen Menge von Vektoren entscheiden kann, ob der minimale Abstand der (unterschiedlich vielen) Vektoren kleiner ist als ein bestimmter Schwellenwert. In diesem Fall soll das RNN eine 1 ausgeben, ansonsten eine Null.

In den betrachteten RNNen ist jedes Neuron einer Schicht mit jedem Neuron der darauffolgenden Schicht verbunden. Rückkopplungen gibt es nur in vorhergehende Schichten. Da jeder Vektor aus drei Komponenten besteht, befinden sich drei Input-Neuronen im Input-Layer. Hier können noch Kontext-Units hinzukommen. Der Output-Layer besteht nur aus einem Output-Neuron. Vom Output-Layer sollen keine Rückkopplungen ausgehen.

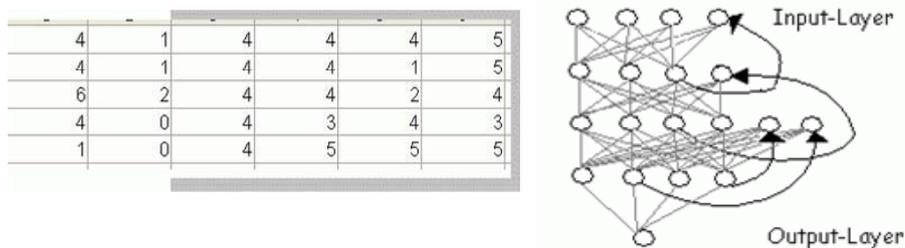
Ein Individuum der Population, auf die der Genetische Algorithmus angewandt wird, entspricht einem RNN. Die Gene eines Individuums stellen die Neuronen des RNNes dar. Realisiert wird dies durch eine Matrix. Jede Zeile steht für einen Layer. In der ersten Komponente einer Zeile steht die Anzahl der gesamten Neuronen ('normale' Units plus Kontext-Units) in diesem Layer. Als normale Units sollen solche Units bezeichnet werden, die keine Kontext-Units sind. In der zweiten Komponente einer Zeile steht die Anzahl der Kontext-Units in diesem Layer.

Ab der dritten Komponente einer Zeile werden die normalen Units folgendermaßen dargestellt: Die Units sind 'linksbündig' angeordnet. Da die Matrix für alle Zeilen die

gleiche Spaltenanzahl besitzt, bestimmt jener Layer mit den meisten normalen Units die Anzahl der Spalten. Da jeder Layer eine unterschiedliche Anzahl an normalen Units besitzt, werden die überflüssigen Komponenten rechts davon mit der Zahl, die die Anzahl der Layer des RNNes darstellt, aufgefüllt. Die Anzahl der Layer des RNNes entspricht der Zeilenanzahl der Matrix. Da es auch zum vorletzten Layer keine Rückkopplung geben kann, wird diese Zahl verwendet um jene normalen Units darzustellen, von welchen keine Rückkopplung existiert. Steht in einer Komponente eine Zahl, welche den vorvorletzten bis zum ersten Layer darstellt, so gibt es von diesem Unit in den Layer, welcher durch diese Zahl dargestellt wird, eine Rückkopplung.

Ein kleines Beispiel zum besseren Verständnis (Bild 5):

Die dritte Zeile der Matrix stellt den dritten Layer des RNNes dar. Die 2 in der fünften Spalte dieser Zeile zeigt eine Rückkopplung in den zweiten Layer an. Die 5 in der letzten Spalte der zweiten Zeile zeigt an, dass es keine weitere normale Unit gibt außer die drei vorhergehenden in dieser Zeile. Die ersten beiden Spalten sind zwar redundant, wurden aber aus praktischen Gründen hinzugefügt.



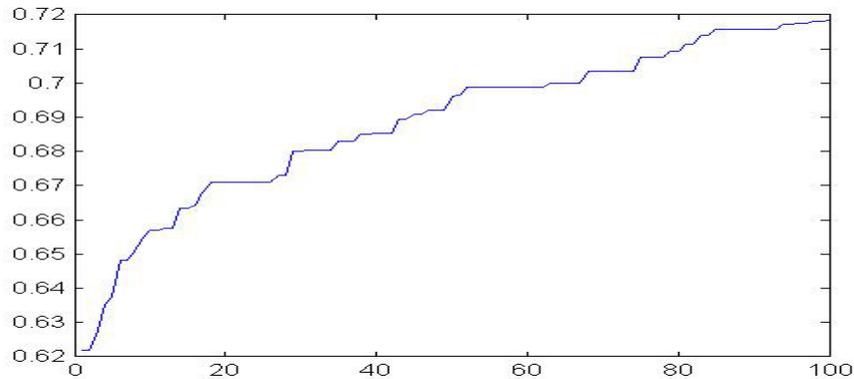
**Bild 5:** Beispiel zum besseren Verständnis.

Für die Rekombination werden zwei Eltern-Individuen zufällig gleichverteilt ausgewählt. Zwischen den Layern wird bei beiden je ein Schnitt gemacht und je ein Teil pro Eltern-Individuum für die Zusammensetzung des neuen Individuums verwendet.

Die beste Vorgehensweise für die Mutation ist noch fraglich. Auf jeden Fall werden die normalen Units der oben grau unterlegten Matrix mutiert. Dadurch fällt mit der Unit auch die zugehörige Kontext-Unit weg. Ebenfalls kann mit einer ca. 12%-igen Wahrscheinlichkeit eine normale Unit plötzlich eine Unit mit Rückkopplung werden. Das Hauptaugenmerk liegt jedoch darin, dass innerhalb bestimmter Rahmenbedingungen (maximale Layer-Anzahl, maximale Unit-Anzahl pro Layer, usw.) jedes mögliche Individuum erreicht werden kann. Angedacht sind noch Mutationen mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit für einen gesamten Layer.

Aus der Elternpopulation und der daraus neu generierten Kinderpopulation kommen die fittesten Individuen als Eltern in die nächste Generation. Für die Ermittlung der Fitness eines Individuums wurden bis jetzt ebenfalls Genetische Algorithmen verwendet. Angedacht sind auch die herkömmlichen Lern-Verfahren für RNN (zum Beispiel Real Time Recurrent Learning, Resilient Back Propagation) mit Ausnahme der Back Propagation Through Time, da hier ab der zehnten Auffaltung in der Zeit das Vanishing-Gradient-Problem entsteht [4]. Das Training eines Individuums ist auf jeden Fall der rechenintensivste Vorgang und mit größter Bedacht auszuwählen. Eine parallele Fitnesser-

mittlung aller Individuen einer Generation, nach welcher Art auch immer, ist sicherlich ein bedeutender Zeitgewinn.



**Bild 6:** Ergebnisse eines Probedurchlaufs nach 100 Generationen.

Bild 6 zeigt die Ergebnisse eines Probedurchlaufs nach 100 Generationen. In der 100. Generation liefern die Individuen im Durchschnitt zu 72 Prozent richtige Ergebnisse.

Generell kann man erkennen, dass bei zwei Hidden Layern die Anzahl der Neuronen in der ersten der beiden versteckten Schichten von wesentlich größerer Bedeutung für die Performanz des Netzes ist als die zweite. Tabelle 1 zeigt die Fehlerquoten nach 500 Trainingsepochen mit 500 Testdaten für neuronale Netze mit 3 bis 15 Neuronen im ersten Hidden Layer (zeilenweise zu lesen) und 3 bis 9 im zweiten Hidden Layer (spaltenweise zu lesen). Generell sieht man, dass sich die Netze allerdings nicht allzu sehr in ihrer Qualität unterscheiden.

**Tabelle 1:** Fehlerquoten nach 500 Trainingsepochen.

0.2331	0.2338	0.2340	0.2332	0.2337	0.2337	0.2341
0.2322	0.2319	0.2325	0.2335	0.2326	0.2335	0.2326
0.2335	0.2327	0.2328	0.2315	0.2309	0.2327	0.2315
0.2335	0.2328	0.2329	0.2323	0.2320	0.2335	0.2324
0.2326	0.2311	0.2327	0.2321	0.2318	0.2323	0.2312
0.2312	0.2315	0.2293	0.2322	0.2301	0.2307	0.2294
0.2312	0.2324	0.2306	0.2309	0.2316	0.2298	0.2330
0.2310	0.2307	0.2308	0.2321	0.2288	0.2307	0.2305
0.2330	0.2293	0.2320	0.2272	0.2284	0.2302	0.2310
0.2286	0.2297	0.2308	0.2314	0.2313	0.2316	0.2295
0.2308	0.2304	0.2301	0.2309	0.2299	0.2311	0.2293
0.2287	0.2318	0.2290	0.2287	0.2308	0.2294	0.2296
0.2290	0.2307	0.2305	0.2298	0.2318	0.2300	0.2295

### 3 Ausblick

Der zukünftige Schwerpunkt liegt in der Verfeinerung der Mutationsoperatoren und in einer möglichst wenig rechenintensiven, idealerweise parallelen Ermittlung der Fitnesswerte. Zusätzlich zur üblichen Mutation soll auch eine sogenannte Meta-Mutation realisiert werden: Die Mutationsschrittweite soll als Gen des Individuums zusätzlich aufgenommen werden und so zu einer schnelleren Konvergenz führen.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auch in der Weiterentwicklung des Ansatzes: Zusätzlich zu den oben beschriebenen Genen eines Individuums (Anzahl der Layer, Anzahl der darin befindlichen Units und die Rückkopplungen, die vom Layer ausgehen) eines RNNes könnte man versuchen die zugehörigen Gewichtsmatrizen als Gene mit aufzunehmen. Dadurch müssten die Gewichtsmatrizen nicht jedes mal neu initialisiert werden. Möglicherweise ergibt sich so ein weiterer Vorteil sowohl für die Dauer der Berechnungen als auch für die Konvergenz.

Außerdem ist eine geeignete, möglichst gut gewichtete Auffüllung der Inputdaten überlegenswert, um eine bessere Performanz zu erreichen.

### 4 Literatur

- [1] *Scholz, A.*: Topologiegenerierung für Neuronale Netze durch Genetische Algorithmen. Berlin, Techn. Univ., Diss., 1995.
- [2] *Heistermann, J.*: Genetische Algorithmen. Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1994.
- [3] *Gerdes, I. Et al.*: Evolutionäre Algorithmen. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2004.
- [4] *Kriesel, D.*: Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze.  
[www.dkriesel.com](http://www.dkriesel.com)
- [5] *Rey, G. D.; Wender, K. F.*: Neuronale Netze, Eine Einführung.  
[www.neuronaletesnetz.de](http://www.neuronaletesnetz.de)
- [6] *Schmidhuber, J.*: Netzwerkarchitekturen, Zielfunktionen und Kettenregel.  
[www.idsia.ch/~juergen/habilitation/](http://www.idsia.ch/~juergen/habilitation/)

# Global optimization in order to find blend composition of gasoline considering ethanol as an octane-booster

Shiva Shakiba and Hamed Shakouri

Email: shivashakiba@yahoo.com, h.shakouri@gmail.com

University of Tehran

North Karegar Ave., Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

## 1 Introduction

Gasoline is one of the most desired products of the petroleum industry. It is produced in a refinery and used as a fuel for transportation. In an integrated refinery, about 70% of the crude is generally converted into gasoline [1]. Gasoline is produced by blending different fuel streams coming from various production processes. Atmospheric straight run cuts together with products from catalytic reforming and cracking, isomerization etc. units are the most commonly used feeds for the production of the final gasoline. These fractions are referred to as gasoline components. The blend recipes are determined such that the properties' specifications of the final gasoline are met, while maximizing the profitability of the product under the constraint of the gasoline component's availability. Therefore, optimum control on gasoline blending operations is a key question in the refineries [2].

The key indication of performance property of gasoline is its octane number (ON). The octane number rating of a gasoline is an indication of how the gasoline will perform under various engine conditions. Two different ratings are included: Research Octane Number (RON) and Motor Octane Number (MON). Finished gasoline must meet certain octane number specifications. Thus refineries control this parameter during production and must certify that a gasoline meets specification before it is released [3].

The typical octane rating of gasoline produced commercially for mobile combustion engines in the mid-1920s was 40-60 octanes. In the last 80 years, the petrochemical methods for the production of fuels improved continuously to meet the demand both on the simultaneously growing amounts and the constantly increasing knock resistance of gasoline. Different additives were applied to achieve the required specifications of the highly knock resisting super grade gasolines used today. So, oxygenous compounds, the so-called oxygenates, are often used as octane-boosters. In addition to the engine sided demands more and more environmental orders become important for the composition of gasoline at the present [4].

Optimization of the quality of automotive gasoline production with respect to anti-knock properties is very important today, since it offers a means for utilizing petroleum raw material more efficiently, reducing the costs in gasoline production, and meeting more fully the demand for fuel in automotive transport [5].

Because of the importance of determining the octane number of gasoline a lot of works have been done for predicting it, but there are a few works about optimizing the octane number of gasoline. In the former case, we can name a lot of researches. Meus-

inger and Moros [4] have been determined the octane number of gasoline compounds from their chemical structure by  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy and neural network. They have been developed a new theoretical model which explains the association between the molecular structure and the knock resistance of individual gasoline compounds convincingly. Pasadakis [2] have been developed artificial neural network (ANN) models to determine the research octane number of gasoline blends produced in a Greek refinery. A prediction of octane number requirements of gasoline and power-to-weight ratio of automotive vehicles has been done by Azev and Gladkikh [6].

In the latter case, we can name a work done by Murty and Rao [1]. They have been developed an artificial neural network to predict research octane number (RON) of motor gasoline and compared it with a multiple linear regression (MLR) model which have been proposed by Zahed. Further they have been applied a global optimization technique to predict probable composition of blends with desired RON specified properties.

## 2 Ethanol as an octane-booster

Octane rating is the most important aspect of gasoline quality and historically, lead has been an important source of increasing octane number. Because of the harmfulness of Tetra-Ethyl Lead (TEL), its use has been forbidden in almost all countries. From February 2002, Iran's refineries just produce unleaded gasoline and replace TEL with methyl *tert*-Butyl Ether (MTBE) for increasing octane number. This replacement was 20 years after introducing of MTBE and 10 years after expanding the universal usage of it.

The use of MTBE has already been forbidden in 25 states of USA and many countries because it may contaminate underground water. Japan has ceased to use MTBE though official specifications continue to allow a 7% volume limit. Moreover, methanol and methanol derivatives such as MTBE and TAME are not favorable in an environmental view point because they are mostly derived from natural gas whose production may contribute to global warming [7].

With MTBE's disadvantages being revealed, ethanol is being considered as an alternative octane source. Ethanol, one of biofuels, is a renewable energy source for alleviate the oil crisis and global climate change. Carbon dioxide produced from ethanol combustion is not considered as a global warming contributor since it is carbon neutral [7].

A lot of researchers tried to examine the possibility of using ethanol instead other octane-boosters [7, 8, 9, 10]. Today, ethanol isn't used in gasoline in Iran but Iran oil industry has been researched the possibility of using ethanol in gasoline. Results show that using ethanol in automobiles fuel is possible and adding ethanol at volume concentrations of up to 10% doesn't need any changes in engine or fueling system of automobiles.

Here we will try to find the optimal volume of gasoline components including ethanol which will maximize the octane number of produced gasoline and then we will examine the possibility of using this amount of ethanol and its expenditure.

Seven most commonly employed refinery streams in the gasoline production are: fluidized catalytic cracking (FCC), reforming (REF), isomerisation (ISO), alkylation (ALK) and dimersol (DIM), together with the butane's fraction (C4) and oxygenate additives such as MTBE or ethanol. These components as well as the ranges of their volumetric content in the blends and of their RON values are presented in Table 1.

**Table 1:** Gasoline components employed for the blends preparation [2]

Fraction	Min vol. %	Max vol. %	Min RON	Max RON	Average RON
FCC	6.6	100.0	92.5	94.0	93.25
REF	0.0	54.4	98.2	103.6	100.9
ISO	0.0	32.0	77.5	86.2	81.85
ALK	0.0	20.7	93.3	94.7	94
DIM	0.0	14.8	93.8	97.6	95.7
C <sub>4</sub>	0.0	7.4	-	-	92.0
Ethanol	0.0	10.0	-	-	116.0

### 3 Global optimization

Decision variables which we will use them in optimization problem and description of them are stated in Table 2.

**Table 2:** Decision variables and their description

Decision variable(x)	Description of x
x <sub>1</sub>	FCC, vol.%
x <sub>2</sub>	REF, vol.%
x <sub>3</sub>	ISO, vol.%
x <sub>4</sub>	ALK, vol.%
x <sub>5</sub>	DIM, vol.%
x <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> , vol.%
x <sub>7</sub>	Ethanol, vol.%

Although the relationship between the RON of produced gasoline and volume of its components with specific RON is non-linear, here we prefer to use a simple linear function to describe this relationship. This function can be stated as:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^7 x_i \times \text{RON}_i}{\sum_{i=1}^7 x_i}$$

where y is the octane number of produced gasoline and RON<sub>i</sub> is the average octane number of i-th variable.

So the optimization problem can be stated as:

$$\text{Maximize } \frac{\sum_{i=1}^7 x_i \times \text{RON}_i}{\sum_{i=1}^7 x_i}$$

Subject to:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 100$$

$$6.6 \leq x_1 \leq 100$$

$$x_2 \leq 54.4$$

$$x_3 \leq 32$$

$$x_4 \leq 20.7$$

$$x_5 \leq 14.8$$

$$x_6 \leq 7.4$$

$$x_7 \leq 10$$

$$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 \geq 0$$

After solving this optimization problem and finding the optimal composition of gasoline components including ethanol, we will calculate the expenditure of adding this amount of ethanol to gasoline.

## 4 References

- [1] *B.S.N. Murty, R.N Rao*: Global optimization for prediction of blend composition of gasolines of desired octane number and properties, *Fuel Processing Technology* 85 (2004) 1595–1602.
- [2] *Nikos Pasadakis, Vassilis Gaganis, Charalambos Foteinopoulos*: Octane number prediction for gasoline blends, *Fuel Processing Technology* 87 (2006) 505–509.
- [3] *Guided Wave Incorporated*: Application – Octane Number of Gasoline, Process analytical systems.
- [4] *R. Meusinger, R. Moros*: Determination of octane numbers of gasoline compounds from their chemical structure by <sup>13</sup>C NMR spectroscopy and neural networks, *Fuel* 80 (2001) 613-621.
- [5] *B. A. Englin, Yu. N. Nilov, V. Eo Emel'yanov, and G. I. Levinson*: Optimization of component composition and antiknock properties of AI-93 gasoline, *Improvement of fuel quality*, No. 11, pp. 19-22, November, 1981.
- [6] *V. S. Azev, V. A. Gladkikh, F. V. Smal', and V. I. Tyukov*: Optimization of octane number requirements of gasolines and power-to-weight ratio of automotive vehicles, *Prospects and problems in the use of traditional motor fuels*, No. 11, pp. 4-7, November, 1985.
- [7] *Worapon Kiatkittipong, Piyaporn Thipsunet, Shigeo Goto, Choowong Chaisuk, Piyasan Praserttham, Suttichai Assabumrungrat*: Simultaneous enhancement of etha-

nol supplement in gasoline and its quality improvement, Fuel processing technology 89 (2008 ) 1365-1370.

- [8] *Hassan Ahrned,\* Norman Rask, Dean Baldwin*: Ethanol Fuel as an Octane Enhancer in the US Fuel Market, Biomass 19 (1989) 215-232.
- [9] *Valerie Thomas, Andrew Kwong*: Ethanol as a lead replacement: phasing out leaded gasoline in Africa, Energy Policy 29 (2001) 1133–1143.
- [10] *M. Bahattin Celik*: Experimental determination of suitable ethanol–gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 396–404.

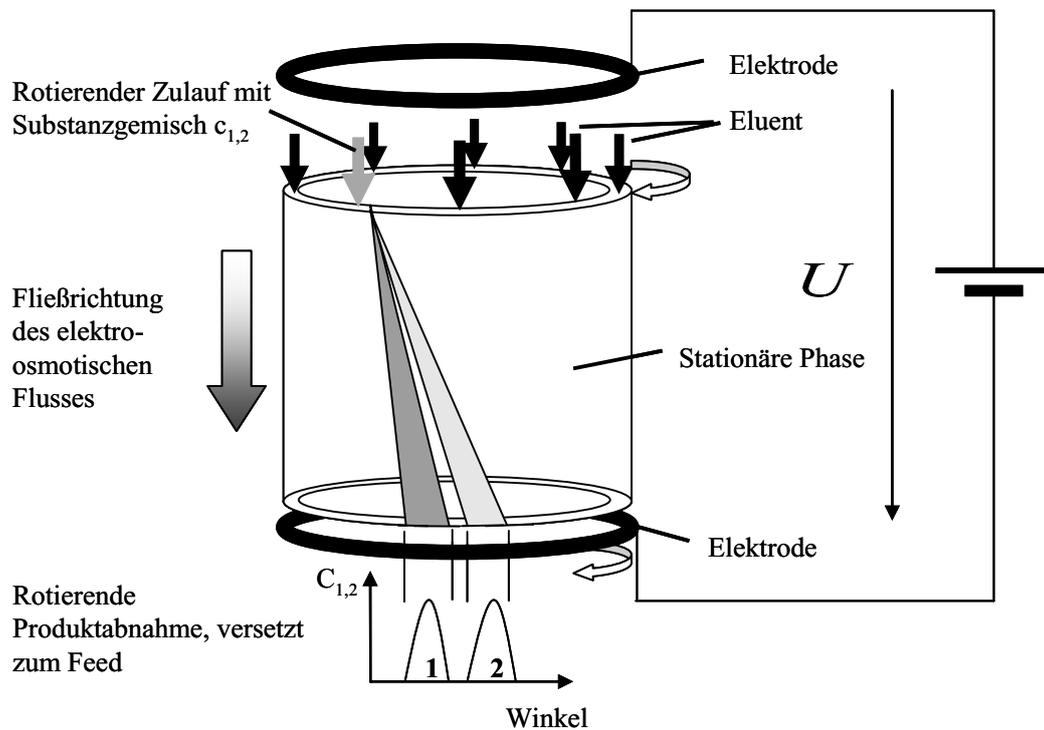
# Dynamische Simulation und Optimierung annularer Elektro-Chromatographie

Malte Behrens und Sebastian Engell  
Malte.Behrens@bci.tu-dortmund.de  
Technische Universität Dortmund, Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen  
Emil-Figge Str. 70, 44227 Dortmund

## 1 Einleitung

Die kapillare Elektrochromatographie ist eine Kombination der Kapillarelektrophorese und der Hochdurchsatz Flüssigkeitschromatographie. Sie besitzt für analytische Anwendungen großes Potential aufgrund ihrer hohen Trenneffektivität. Ein Transfer dieses Verfahrens in den präparativen Maßstab verspricht diese Trennleistung auch für die industrielle Aufreinigung in der Biotechnologie und pharmazeutischen Produktion nutzbar zu machen. Durch den Einsatz des Konzeptes der annularen Chromatographie (AC) bietet sich zusätzlich die Möglichkeit einer kontinuierlichen Fahrweise. Das Resultat dieser Kombination, die annulare Elektro-Chromatographie (AEC), ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Triebkraft für die axiale Flüssigkeitsbewegung relativ zu der funktionalisierten stationären Phase ist der elektroosmotische Fluss (EOF), der sich durch die elektrokinetische Ionenbewegung in der Flüssigkeit in einem axialen elektrischen Feld einstellt. Der EOF hängt in einem gegebenen Fest-Flüssigsystem von vielen physikalischen und chemischen Parametern ab. Dazu zählen die Porosität, die Ladungsdichteverteilung an der Oberfläche der Festphase, die Lösungsmittelzusammensetzung und die Oberflächenrauigkeit. Beispielsweise erhält man bei verschiedenen Rauigkeiten in einem Mikrokanal eine starke Abhängigkeit des Volumenstroms und der Geschwindigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Festphase [1]. Auch Simulationsstudien über den Einfluss sprunghafter Änderungen des Zetapotentials (eine charakteristische Größe des Potentials zwischen Oberfläche und Bulk) [2] und variabler Oberflächenladungsdichte oder Schüttungseigenschaften [3] verdeutlichen die Komplexität der Phänomene und die Sensitivität des EOF.

Die Simulation eines eindimensionalen chromatographischen Prozesses als Werkzeug der Prozessoptimierung oder Regelung erhebt in der Regel nicht den Anspruch, alle Details entlang der Säule nachzubilden, sondern muss lediglich die Vorhersage des resultierenden Chromatogramms leisten. Die Anpassung der Modellparameter lässt oft genügend Freiheit, um Inhomogenitäten pauschal zu berücksichtigen, vor allem wenn sich diese nicht mit der Zeit ändern. Bei der annularen Chromatographie findet die Trennung jedoch in einem Ringspalt statt, in dem jeder Abschnitt in Umfangsrichtung ein eigenes chromatographisches System darstellt. Dadurch wirken sich Inhomogenitäten auf das Umfangschromatogramm stärker aus und müssen daher berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit wird eine flexible Modellierung und Simulation der annularen Elektro-Chromatographie unter Berücksichtigung variabler Systemparameter vorgestellt und zur Optimierung der Produktivität eingesetzt.



**Bild 1:** Prinzip der annularen Elektro-Chromatographie.

## 2 Modellierung

Zur Modellierung des Prozesses wurden die folgenden Annahmen bzw. Vereinfachungen getroffen:

- (1) Es wird die Trennung eines Zweistoffgemisches betrachtet.
- (2) Die Festphase ist ein Monolith, dessen Porosität mikroskopisch homogen und daher über nur eine Größe, die Porosität  $\epsilon$ , beschreibbar ist. Im Gegensatz zu einer Feststoffschüttung wird also nicht zwischen inter- und intrapartikulärem Zwischenraum unterschieden.
- (3) Die Konvektion entsteht nur durch Ausbildung des EOF, nicht durch eine Druckdifferenz.
- (4) Der Massentransfer zwischen Flüssigphase und Festphase hängt linear von der Differenz zum Gleichgewicht zwischen den beiden Phasen ab [4].
- (5) Das Gleichgewicht der Adsorption wird über eine binäre Langmuir Isotherme beschrieben.
- (6) Der Eintritt des Stoffgemisches in den Monolithen über die Länge  $\theta_{\text{feed}}$  erfolgt mit der Geschwindigkeit des EOF an dieser Stelle. Aufgegebenes Feedvolumen und durch den EOF abgeführtes Volumen stimmen exakt überein (keine Verdünnung oder Akkumulation oberhalb der Feststoffphase).

- (7) Die Dispersion in Umfangsrichtung ist um ca. eine Größenordnung niedriger als in axialer Richtung [5].
- (8) Die Dicke des Ringspaltes ist im Verhältnis zum Durchmesser des Annulus so klein, dass eine planare Geometrie der Festphase angenommen werden kann.

Daraus ergibt sich die folgende differentielle Massenbilanz für die Konzentration  $c_i$  bzw.  $c_{s,i}$  der zu trennenden Substanzen in der flüssigen Phase und auf der Festphase (mit den Dispersionskoeffizienten  $D$ , der axialen Geschwindigkeit  $u$ , der Porosität  $\varepsilon$ , der Feldstärke  $E$ , der Boltzmannkonstante  $k$ , des Massentransferkoeffizienten  $k_f$ , der Temperatur  $T$ , der Elementarladung  $e$  und der stöchiometrischen Ladungszahl  $z_i$  in der axialen Koordinate  $z$  und der Umfangskoordinate  $\theta$  und der Zeit  $t$ ) [5, 6, 7 – 9].

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u \frac{\partial c_i}{\partial z} + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} = D_z \left( \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} - \frac{z_i e E}{kT} \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + D_\theta \frac{\partial^2 c_i}{\partial \theta^2}$$

$$\frac{\partial c_{i,s}}{\partial t} = k_{f,i} (q_i - c_{s,i}) \quad q_i = \frac{a_i c_i}{1 + b_i c_i + b_j c_j}, j \neq i$$

Die Gleichgewichtsbeladung  $q$  ist eine Funktion der Konzentration in der Flüssigkeit und wird über die kompetitive Langmuir Isotherme beschrieben (unten rechts). Durch Multiplikation mit  $L/u$  ergibt sich ein dimensionsloses Gleichungssystem mit den dimensionslosen Koordinaten  $x=z/L$ ,  $y=\theta/B$  und  $\tau=ut/L$  ( $L$  und  $B$  sind die Höhe und die Breite des Festbettes).

### 3 Numerische Simulation

Die differentielle Massenbilanz jeder Komponente in der Flüssigphase wurde mit Hilfe eines Exponential High Order Compact Alternating Direction Implicit (EHOC ADI) Verfahrens [10] örtlich und zeitlich diskretisiert und damit die partielle DGL auf ein algebraisches Gleichungssystem reduziert und gelöst. Dieses Verfahren stellt eine relativ neue Alternative zu den in der Simulation von chromatographischen Prozessen angewandten Galerkin-Verfahren oder der Kollokation auf finiten Elementen dar [11-13] und wird hier erstmals für die Anwendung in der Chromatographie beschrieben.

Folgende Gleichungen, in denen die Differenzen Operatoren für die erste und zweite örtliche Ableitung der Konzentrationen und die Koeffizienten der PDE für die jeweilige Koordinate in den Größen  $L_{x,y}$  und  $A_{x,y}$  zusammengefasst sind (vgl. [10]), sind durch die Matrixinversion der Matrix  $Z_x$  zunächst für die Zwischenvariable  $C^*$  und dann im zweiten Schritt für die Zielgröße  $C$  zum Zeitpunkt  $n+1$  (Inversion von  $Z_y$ ) zu lösen. Der Quellterm  $S^{n+1}$  bezeichnet dabei den Massentransfer mit der festen Phase zum Zeitpunkt  $n+1$ . Da dieser nicht explizit bekannt ist sondern von der Zielgröße  $C$  abhängt, wird die Lösung des Gesamtsystems iterativ angenähert (vgl. Bild 2). Das EHOC ADI basiert auf einer Herleitung, bei der von konstanten Koeffizienten in der partiellen DGL ausgegangen wurde. Die Erweiterung auf örtlich variable Koeffizienten ist grundsätzlich möglich

[10] und wurde auch in dieser Arbeit verwendet. Allerdings liegen über die Fehlerordnung in diesem Fall keine Ergebnisse vor. Als Inhomogenität ist bei der annularen Elektro-Chromatographie vor allem eine in Umfangsrichtung variable axiale Konvektion von Interesse. Die Porosität hingegen beeinflusst den Quellterm  $S$  und kann örtlich variabel sein ohne die Fehlerordnung zu beeinflussen [10].

$$\underbrace{\left(L_x + \frac{\Delta t}{2} A_x\right)}_{Z_x} C^* = \left(L_x - \frac{\Delta t}{2} A_x\right) \left(L_x - \frac{\Delta t}{2} A_x\right) C^n + \frac{\Delta t}{2} L_x L_y (S^n + S^{n+1})$$

$$\underbrace{\left(L_y + \frac{\Delta t}{2} A_y\right)}_{Z_y} C^{n+1} = C^*$$

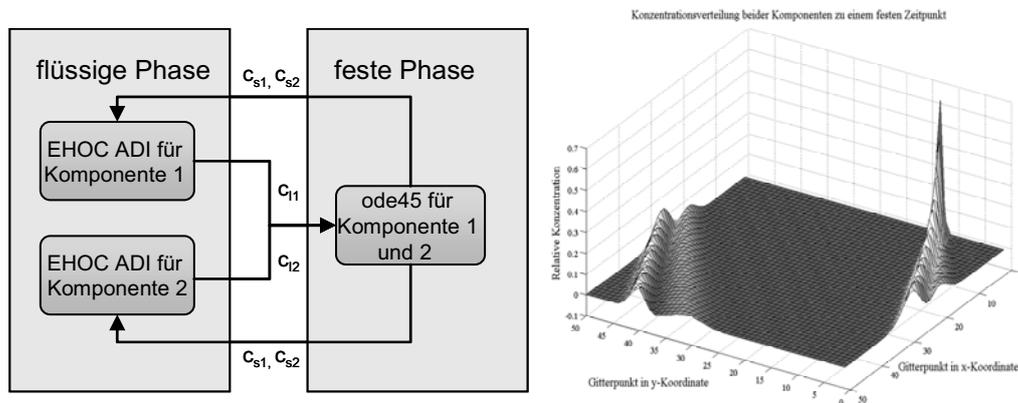
$$C|_{y=0} = C|_{y=1-} \quad C|_{y=1} = C|_{y=0+}$$

$$C|_{x=0, y \in \theta_{feed}} = 1 \quad \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=1} = 0$$

Wesentlich für die numerische Simulation der annularen Chromatographen sind die Randbedingungen, die den rotierenden Feed und die zylindrische Geometrie der Festphase beschreiben. Unter den oben genannten Vereinfachungen liegt ein Bereich mit der Länge  $\theta_{feed}$  am ersten Diskretisierungspunkt am oberen Rand der Domäne vor, an dem das zu trennende Gemisch mit Feedkonzentration eintritt. Dieser Bereich bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $\omega$ . Für die stationäre annulare Chromatographie mit konstanten physikalischen Parametern der Festphase kann durch eine Koordinatentransformation ( $\theta = \omega t$ ) diese zeitliche Veränderung des Feedbereiches durch einen konvektiven Term in der Massenbilanz in Umfangsrichtung ersetzt werden [5, 7, 8]. Der Vorteil dieser Transformation ist die Reduktion des dynamischen Problems auf den stationären Fall, die aber bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Feedaufgabe und Produktabnahme (wichtig im Hinblick auf Regel- und Optimierungsproblemstellungen) und bei Inhomogenitäten des Festbettes oder des EOF nicht mehr zulässig ist. Daher wurde diese Transformation nicht verwendet. Die zylindrische Geometrie wird berücksichtigt, indem gefordert wird, dass die Konzentrationen am rechten und linken Rand der Domäne übereinstimmen. Dies genügt jedoch nicht. Es hat sich gezeigt, dass erst durch die Definition eines sich überlappenden Bereiches mit der Breite der Maschenweite des Diskretisierungsgitters eine stabile Simulation möglich ist (symbolisiert durch + bzw. – in den Randbedingungen). Beschreibt man die Bewegung der Feedaufgabe über variierende Randbedingungen, was den tatsächlichen Bedingungen bei der AC entspricht, so stellt sich das Problem, dass eine kontinuierliche Bewegung über eine ortsdiskrete Domäne beschrieben werden muss. Um dem gerecht zu werden, wurden die Konzentrationen anteilig auf alle betreffenden Diskretisierungspunkte verteilt, je nach Position des Feeds über dem Gitter. Die theoretisch in Umfangsrichtung steile Konzentrationsfront am Eintritt in die Domäne wird dadurch abgeflacht, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Für die feste Phase liegt ein inhomogenes DGL-System vor. Neben dem Massentransfer für beide Komponenten werden Gleichungen für die Ableitungen der Konzentration in der Flüssigkeit und der Sättigungskonzentrationen  $Q$  nach der Zeit benötigt. Sie sind durch finite Differenzen der Ergebnisse des EHOC ADI gegeben. Die Lösung erfolgte

über den MATLAB Solver ode45 [14] für jeden Gitterpunkt und liefert eine Annäherung der Feststoffkonzentrationen beider Komponenten zum Zeitpunkt  $n+1$ . Auch die Lösung des Gesamtsystems, bestehend aus jeweils einer Anwendung des EHOc ADI auf die zwei Komponenten in der Flüssigphase und einer Lösung des inhomogenen DGL-Systems, wurde in MATLAB realisiert. Die drei Gleichungssysteme sind dabei jeweils über die Konzentrationen der Komponenten in der anderen Phase gekoppelt (vgl. Bild 2). Für eine relative Genauigkeit der Festphasenkonzentration von  $10^{-4}$  werden weniger als 5 Iterationen pro Zeitschritt benötigt.



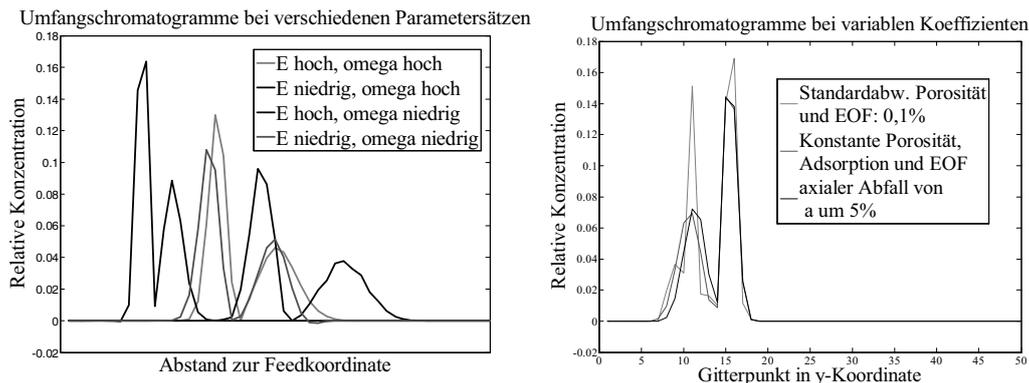
**Bild 2:** Iterationsschema und Simulationsergebnis für konstante Koeffizienten.

## 4 Ergebnisse der Simulation

Im Hinblick auf das Einsatzgebiet der annularen Elektrochromatographie zur kontinuierlichen Gewinnung reiner hochwertiger Produkte in kleinen Mengen war das Ziel der Simulationsstudien die Ermittlung der qualitativen Einflüsse der Stellgrößen  $\omega$  und  $E$  sowie örtlich variierender Modellparameter bei sehr hoher Reinheit (>99,9%) und Ausbeute (>99%). Da bisher keine Messwerte für eine Trennung in einem AEC-System vorliegen, wurden die stoffspezifischen Parameter zunächst so gewählt, dass bei moderaten Betriebsparametern eine vollständige Trennung erreicht wird. Die Parameter entsprechen daher keinem realen Stoffsystem, sind aber in physikalisch-chemisch sinnvollen Bereichen. Für die Abhängigkeit der axialen Geschwindigkeit von der angelegten Spannung wird eine lineare Korrelation angenommen.

Bild 2 zeigt beispielhaft die Konzentrationsverteilung bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 0,0004 m/s und einer Spannung von 21 kV (Gitter: 50 x 50, Zeitschritt 8 sec, Konzentration im Feed: jeweils 1g/l). Die Simulation zeigt die für die annulare Chromatographie typischen Konzentrationsverteilungen. Das zeitabhängige Konzentrationsprofil an einem Punkt des Annulus kann durch die Koordinatentransformation  $t=\theta/\omega$  in das örtliche Profil zu einem festen Zeitpunkt überführt werden. Der Einfluss der elektroosmo-

tisch erzeugten Konvektion im Vergleich zur Konvektion durch Druckdifferenz spiegelt sich hauptsächlich in geringeren Dispersionskoeffizienten [3] und der starken Jouleschen Wärmeerzeugung wider. Mit den konstanten Koeffizienten wurde zunächst eine isotherme Fahrweise angenommen und somit unterscheidet sich das in Bild 2 erhaltene Profil qualitativ nicht von dem der herkömmlichen AC. Bild 3 zeigt den Einfluss der Stellgrößen ( $\omega$  und  $E$ ) auf die Konzentrationsverteilung im Falle eines idealen Festbettes. Eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit bei gleichbleibendem Feedvolumenstrom verbreitert die Peaks in Umfangsrichtung, senkt die Konzentration der Produkte im Produktstrom und erhöht den Winkel zwischen x-Achse und Konzentrationsfront. Eine Erhöhung der Spannung führt zu stärkerem EOF und damit zu einem erhöhten Feedvolumenstrom und wirkt diesem Effekt in allen Punkten entgegen. Bei zu geringer Winkelgeschwindigkeit und gleichzeitig zu hoher Spannung wird keine vollständige Trennung mehr erreicht. Ebenso führt eine zu hohe Winkelgeschwindigkeit zu derart verbreiterten Peaks, dass sich Anfangsposition der schwächer adsorbierenden Komponente (kleinere Werte der y-Koordinate) mit Endposition der stärker adsorbierenden Komponente überlappen, also ebenfalls keine vollständige Trennung vorliegt. Es gibt folglich einen vom EOF abhängigen Winkelgeschwindigkeitsbereich, indem eine vollständige Trennung möglich ist (vgl. [5]). Nur dieser Bereich ist aus verfahrenstechnischer Sicht interessant.



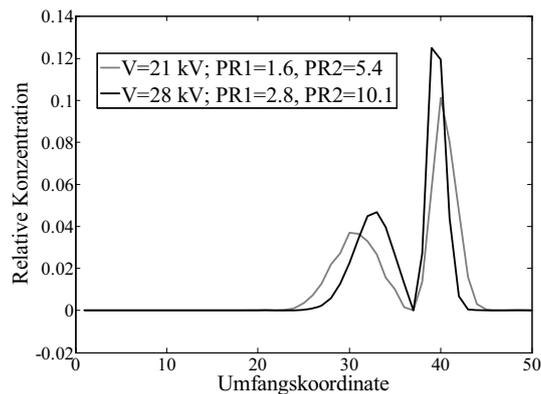
**Bild 3:** Umfangschromatogramme bei verschiedenen Parametersätzen (links) und Einfluss variabler Porosität und axialer Geschwindigkeit (rechts).

Bild 3 (rechts) zeigt die Konzentrationsprofile bei einer Normalverteilung der Porosität über alle Gitterpunkte und einer Normalverteilung des EOF über die Umfangskoordinate  $y$ , jeweils mit einer Standardabweichung von 0,1%. Die stark unterschiedlichen Konzentrationsverläufe verdeutlichen die Notwendigkeit dieser Berücksichtigung. Ebenfalls in Bild 3 ist der Einfluss eines in axialer Richtung um 5% linear abfallenden Adsorptionsparameters  $a_i$  gezeigt, wodurch die Ausbildung eines axialen Temperaturprofils durch die Joulesche Wärmeentwicklung und damit eine axial variierende Adsorption nachgebildet werden kann. Das Simulationsverfahren ist somit in der Lage, die in der AEC wichtigen physikalischen Aspekte zu berücksichtigen.

## 5 Optimierung der Produktivität

Der optimale Betriebspunkt einer chromatographischen Trennung ist derjenige, bei dem mit möglichst hohem Durchsatz (hoher axialer Geschwindigkeit) gerade noch eine vollständige Trennung vorliegt. Dabei sei hier vorausgesetzt, dass die Produktabnahme ideal verläuft, also jeder beliebige Punkt am unteren Rand des Annulus als Anfangs oder Endpunkt des zu sammelnden Auslaufbereiches definiert werden kann. Neben der Maximierung der Produktivität (Masse an reinem Produkt pro Zeit) ist weiterhin eine minimale Verdünnung der Produkte von Vorteil um den Gesamtvolumenstrom zu minimieren und anschließende Aufkonzentrierungen zu vereinfachen. Durch die Minimierung des Quotienten  $\omega/u^2$  werden diese beiden Forderungen berücksichtigt: Eine Erhöhung der Spannung erhöht direkt proportional den Durchsatz (und erniedrigt den Quotienten  $\omega/u^2$ ), muss aber zwangsläufig mit einer Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit einhergehen, um die Reinheits- und Ausbeuteanforderungen zu erfüllen. Die Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit soll aber möglichst gering sein, um das Produkt nicht unnötig zu verdünnen. Dies wird durch  $\omega$  im Zähler berücksichtigt. Es ergibt sich folgende Formulierung des Problems:

$$\begin{aligned} \min_{\omega, E} \quad & \frac{\omega}{u^2} = f(\omega, E) \\ \text{u.B.v.} \quad & \text{Ausbeute} \geq \text{Ausbeute}_{\min} \\ & \text{Reinheit} \geq \text{Reinheit}_{\min} \\ & E \leq E_{\max} \end{aligned}$$



**Bild 4:** Formulierung und Ergebnis der Optimierung.

Die Berechnung der Kostenfunktion und ihres Gradienten ist trivial, die Schwierigkeit der Optimierung ergibt sich durch die Auswertung der Nebenbedingungen, bei denen implizit die Schnitte zur Trennung der beiden Substanzen bestimmt werden müssen. Aufgrund der diskreten Auflösung der Umfangschromatogramme ist der Verlauf der Nebenbedingungen unstetig. Bild 4 zeigt graphisch ein Ergebnis der Optimierung (Algorithmus „fmincon Active set“ [14]). Der Optimale Betriebspunkt liegt aufgrund der Minimierung von  $\omega$  an der Grenze der Reinheits- und Ausbeuteanforderung und bei maximal zulässiger Spannung. Die Produktivität konnte für beide Produkte um 42% bzw. 34% gegenüber dem Startwert der Optimierung gesteigert werden.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des durch das Siebte Rahmenprogramm (RP7) der Europäischen Kommission geförderten Projektes “Continuous Annular Electro-Chromatography” (CAEC) durchgeführt. Projektreferenz: NMP2-SL-2008-206707.

## 6 Literatur

- [1] *D. Yang, Y. Liu*: Numerical simulation of electroosmotic flow in microchannels with sinusoidal roughness, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects* (2008), S. 28–33.
- [2] *X. Chen; Y.C. Lam; X.Y. Chen; J.C. Chai; C. Yang*: Numerical Simulation of Electroosmotic Flow with Step Change in Zeta Potential. <http://hdl.handle.net/1721.1/7457>.
- [3] *D. Hlushkou, S. Khirevich, V. Apanasovich, A. Seidel-Morgenstern, U. Tallarek*: Pore-Scale Dispersion in Electrokinetic Flow through a Random Sphere Packing, *Analytical Chemistry* 79 (2007), S. 113–121.
- [4] *A.I. Liapis, J.J. Meyers, O.K. Crosser*: Modeling and simulation of the dynamic behavior of monoliths - Effects of pore structure from pore network model analysis and comparison with columns packed with porous spherical particles, *Journal of Chromatography A* (1999), S. 13–25.
- [5] *A. Thiele, T. Falk, L. Tobiska, A. Seidel-Morgenstern*: Prediction of elution profiles in annular chromatography, *Computers and Chemical Engineering* (2001), S. 1089–1101.
- [6] *B.A. Grimes, A.I. Liapis*: Modeling and Analysis of the Electrokinetic Mass Transport and Adsorption Mechanisms of a Charged Adsorbate in Capillary Electrochromatography Systems Employing Charged Nonporous Adsorbent Particles, *Journal of Colloid and Interface Science* (2001), S. 223–243.
- [7] *J. Wolfgang, A. Prior*: Continuous Annular Chromatography, in: *F. Svec, A. Podgornik* (Eds.) *Modern Advances in Chromatography*, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2002, S. 233–255.
- [8] *F. Hilbrig, R. Freitag*: Continuous annular chromatography. Review, *Journal of Chromatography B* (2003), S. 1–15.
- [9] *H.-J. Bart, J. Wolfgang, A. Prior, C. Beyer*: Kontinuierliche Trennung von Kohlehydraten mittels annularer Chromatographie, *Chemie Ingenieur Technik* (1998), S. 142–144.
- [10] *Z.F. Tian, Y.B. Ge*: A fourth-order compact ADI method for solving two-dimensional unsteady convection–diffusion problems, *Journal of Computational and Applied Mathematics* (2007), S. 268–286.
- [11] *G. Dünnebier*: Effektive Simulation und mathematische Optimierung chromatographischer Trennprozesse. Dissertation, Dortmund, 2000.
- [12] *S. Engell, A. Toumi*: Optimisation and control of chromatography, *Computers & Chemical Engineering* 29, S. 1243–1252.

- [13] *K.U. Klatt, G. Dunnebier, S. Engell*: Modeling and computationally efficient simulation of chromatographic separation processes, *Mathematics and Computers in Simulation* 53, S. 449-455.
- [14] I. *The MathWorks*: MATLAB, 2008.

# Vergleich zweier Fahrplankonzepte mit Hilfe einer Betriebssimulation

Doris Tuna<sup>1</sup>, Andreas Schöbel<sup>1</sup>, Dietmar Zierl<sup>2</sup> und Gerhard Besau<sup>2</sup>  
doris.tuna@tuwien.ac.at, andreas.schoebel@tuwien.ac.at

<sup>1</sup>Institut für Verkehrswissenschaften, TU-Wien, Forschungsbereich für Eisenbahnwesen,  
Verkehrswirtschaft und Seilbahnen, TU-Wien, Institut für Verkehrswissenschaften,  
Karlsplatz 13 / E2302, 1040 Wien

dietmar.zierl@bau.oebb.at, gerhard.besau@bau.oebb.at

<sup>2</sup>ÖBB Infrastruktur Bau AG, Ivenotgasse 10, 1120 Wien

## Kurzfassung

Die Kapazität von Hauptbahnhöfen hängt in erster Linie von der Anzahl der Bahnsteigkanten, der Anzahl von Gleisen der freien Strecke, der Anzahl von Weichenverbindungen und der Mindestzugfolgezeit unmittelbar im Bahnhofsbereich ab. Um die Auswirkungen dieser Parameter zu untersuchen, ist es sinnvoll ein Simulationsprogramm zu verwenden, welchen den Planfall sowie diverse Verspätungsfälle des Betriebsprogramms prüft. Insbesondere beschäftigt sich diese Arbeit mit der Untersuchung zweier verschiedener Fahrplankonzepte und deren Durchführung auf zwei verschiedenen Infrastrukturen im selben Bahnhof. Die Betriebssimulation soll Aufschluss darüber geben, welche Gleisbelegungen und Dispositionsoptionen notwendig sind um die beiden Fahrplanangebote sowohl im Planfall als auch im Verspätungsfall abwickeln zu können.

## 1 Einleitung

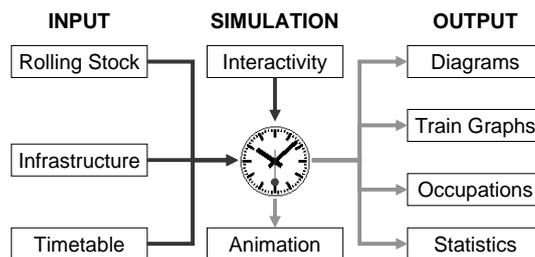
Der Grund dieser Arbeit liegt im Umbau des Hauptbahnhofs Salzburg, der bis jetzt als Doppelkopfbahnhof ausgeführt war und als Grenzbahnhof zwischen Bayern und Österreich fungierte. Diese Gleiskonfiguration basiert im Wesentlichen auf dem Umbau aus den Jahren 1906 bis 1909. Aufgrund des Grenzbahnhofcharakters besteht eine Mittelinsel, die aus heutiger Sicht den Fahrgastwechsel erheblich beeinflusst. Auch die Tatsache das ein großer Prozentsatz der ankommenden Züge in Salzburg stürzen muss, begünstigte die Entscheidung den Hauptbahnhof Salzburg in einen Durchgangsbahnhof umzubauen, um die Achse Paris – Straßburg – Stuttgart – Wien – Bratislava (TEN Axis No. 17) innerhalb des Transeuropäischen Netzwerks zu optimieren.

Somit steht die ÖBB-Infrastruktur Bau AG vor der Aufgabe, den bestehenden Hauptbahnhof in Salzburg den künftigen verkehrlichen und betrieblichen Anforderungen anzupassen. Allerdings muss angemerkt werden, dass dieser Umbau sich nicht nur auf die Gleisanlagen sondern auch auf Teile der vorhanden, denkmalgeschützten Hochbauten bezieht. Im Laufe der Machbarkeitsstudie wurden zwei Gleiskonzepte entwickelt, die sich vor allem in der Ausbildung des Westkopfs – Richtung Freilassing unterscheiden. Um die beiden Fahrplanangebote und Infrastrukturkonzepte bezüglich ihrer Funktionalität zu

beurteilen, wurde eine Mehrfachsimulation des Eisenbahnbetriebes mit Hilfe des Simulationsprogramms OpenTrack als zweckmäßiges Instrument gewählt.

## 2 Arbeitsweise, Methodik

Die Simulation wird mit Hilfe des Programms OpenTrack [OpenTrack Railway Technology, Ltd. By D. Hürlimann, Release 1.5.3. (28.08.2008)] [1] durchgeführt. Die prinzipielle Arbeitsweise von OpenTrack ist Bild 1 zu entnehmen.



**Bild 1:** Arbeitsweise im OpenTrack

Um die Eignung der Infrastrukturvarianten für die verschiedenen Fahrplankonzepte zu prüfen, muss die Stabilität der Fahrpläne auf den zugrunde gelegten Infrastrukturvarianten untersucht werden. [2] Hierfür ist es auch erforderlich, die sogenannten Kreuzvarianten abzubilden; dadurch entstehen 4 zu untersuchende Varianten (siehe Bild 2)



**Bild 2:** Variantenbildung für die Betriebssimulation

## 3 Die Simulation

Um die Betriebssimulation erfolgreich anwenden zu können, benötigt man für die Infrastruktur die Kilometrierung der Einfahr- und Ausfahrtsignale, sowie die dazugehörigen Geschwindigkeiten und etwaige andere Geschwindigkeitsänderungen für jedes Gleis, die Lage der Haltepunkte und die betrieblich relevanten Parameter (z. B. Festlegung von Teilfahrstrassen und deren Auflösungsbedingungen).

Wichtige Parameter für die Fahrplankonstruktion in OpenTrack sind Eckdaten, wie fixe Abfahrtszeiten und minimale Haltezeiten. Wunschankunftszeiten und Anschlusszüge (Wendezüge) sind weitere Faktoren, die die Fahrplanstabilität beeinflussen können, da dadurch Fahrstraßen- und Bahnsteigbelegungen fixiert werden, die wiederum betriebsbehindernd wirken können.

Das Fahrplanmodell A beschreibt ein getaktetes System, wodurch der Anschauungszeitraum auf eine Stunde begrenzt wird. Wie sich herausstellte, mussten zeitliche Verschiebungen der Taktlagen vorgenommen werden um alle notwendigen Fahrstraßen zu erlauben.

Das Fahrplanmodell B wurde so gewählt, dass die Anzahl der Züge im Betrachtungszeitraum ein Maximum erreichten.

Für die Simulation ist es wichtig, die Eingangsparameter festzulegen. Dazu gehören die verschiedenen Fahrstraßenmöglichkeiten und natürlich die Modellzüge, welche OpenTrack in einer gesonderten Datenbank speichert. Den Modellzügen müssen dann die erlaubten Fahrstraßen mit deren Priorität zugewiesen werden, wobei gesagt werden muss, dass bei dieser Simulation die Anzahl der Prioritäten auf maximal drei beschränkt wird, um noch einen gewissen Überblick zu gewährleisten. Weiters werden den Modellzügen sowohl Ankunfts- als auch Abfahrtszeiten im Hauptbahnhof Salzburg zugewiesen. Sobald diese Eingangsparameter fixiert sind, kann mit der Simulation im Planfall begonnen werden. Es ist wichtig, dass der Planfall konfliktfrei abläuft, das bedeutet, dass weder unerwartete Bremsvorgänge noch Halte oder verspätete Abfahrtszeiten entstehen dürfen. Falls doch Konflikte im Planfall auftreten, muss mit Hilfe von Disposition die Fahrstraßenpriorität so geändert werden um den Störfall zu eliminieren.

In der vorliegenden Arbeit konnte mittels Disposition und einer zeitlichen Verschiebung der Taktlage ein konfliktfreier Planfall für alle vier Varianten hergestellt werden.

Im nächsten Schritt werden Einbruchsverspätungen eingeführt. Nun kann zwischen verschiedenen Szenarien ausgewählt werden. OpenTrack verfügt über 200 Szenarien, wobei jedes einzelne immer wieder dieselben Verspätungen durchspielt. Für die Mehrfachsimulation des Hauptbahnhofs Salzburg waren 100 Verspätungsszenarien notwendig um eine ausreichende Ergebnissicherheit zu erhalten.

Offensichtlich kann ein gestörter oder verspäteter Fahrplan nicht ohne Konflikte auskommen. Jedoch ist darauf zu achten, dass keine DeadLocks (die Fahrstraßenbelegungen zweier Züge überschneiden sich und eine Weiterfahrt der Züge ist daher nicht möglich) entstehen, da ansonsten wieder mittels aktiver Disposition eine Lösung gefunden werden muss. Die Konfliktnzahl kann als Basis zur Bewertung der Fahrplanstabilität herangezogen werden.

Ein weiteres Tool von OpenTrack ist die Ausleuchtung der Gleisbelegung. Dabei kann gewählt werden zwischen der durchschnittlich belegten Zeit oder der durchschnittlichen Anzahl der Züge. Hierbei werden Gleisabschnitte, die auf ihre Belegungsstatistik hin geprüft werden sollen, ausgewählt und nach der Simulation farblich dargestellt. Die Skalierung kann dabei manuell umgestellt und somit auch dem Verkehrsaufkommen angepasst werden. Diese Belegungsoption kann hilfreich sein bei weiteren Untersuchungen von Weichenverbindungen.

## 4 Ergebnisse

Alle vier Varianten können im Planfall konfliktfrei mit einer Mindestzugfolgezeit von 120sec gefahren werden. Bei diesen ungestörten Modellen entstehen nur geringe Fehlzeiten bei den Kreuzvarianten.

Nach Durchlauf der Mehrfachsimulation im gestörten Betrieb zeigt sich, dass die Anzahl der Verspätungsszenarien mit Konflikten etwa gleichmäßig verteilt ist. Ein besonderes Augenmerk muss hier auf das Betriebsprogramm in Zusammenhang mit der Bahnsteigbelegung gelegt werden. Das Betriebsprogramm stellt an und für sich das Fahrplankonzept dar und nimmt Einfluss auf die Bahnsteigbelegung. Eine transparente Bahnsteigbelegung ist allerdings wichtig für die Fahrgastorientierung und somit beeinflusst diese vor allem den Fahrgastwechsel. Dies stellt eine zusätzliche Herausforderung an die Betriebssimulation, welche das Fahrplankonzept so umsetzen soll, dass auch die Bahnsteigbelegung in Verspätungsfällen die Einsteige- und Umsteigerelationen der Fahrgäste nicht behindert. Somit werden auch in Verspätungsfällen nur die benachbarten Bahnsteigkanten als Dispositionsoption gewählt um den Fahrgastwechsel nicht zu erschweren.

Eine weitere wichtige Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass mit aktiver Disposition die Mindestzugfolgezeit unmittelbar im Bahnhofsbereich optimiert werden kann, sowohl im Plan- als auch im Verspätungsfall. Hierfür ist allerdings ein Online-Konflikt-Management notwendig, welche Konflikte bei der Zugfolge als auch bei der Bahnsteigbelegung erkennt, wie schon die Schweizer Kollegen [3] angedacht haben.

Der Grundgedanke einer fixen Mindestzugfolgezeit im Bahnhofsbereich muss auf jeden Fall weiter entwickelt werden um somit die Kapazitäten zu steigern. Es stellt sich natürlich die Frage, in wie weit die Mindestzugfolgezeit noch optimiert werden kann um in weiter Folge die Pünktlichkeit der Züge zu erhöhen, indem Konflikte wie ungeplante Bremsvorgänge oder Halte auf der Strecke präventiv verhindert werden. Aufgrund der hohen geplanten Verkehrsdichte wird zur Umsetzung des Betriebsprogramms in der Praxis ebenfalls die aktive Disposition benötigt, welche sowohl die geforderte Mindestzugfolgezeit als auch die Bahnsteigbelegung berücksichtigt.

## 5 Literatur

- [1] *Hürlimann, D.*: OpenTrack, Betriebssimulation von Eisenbahnnetzen; Version 1.3.
- [2] *Hürlimann, D.*: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen, Dissertation, Zürich, 2100.
- [3] *Laube, F.; Roos, S; Wüst, R.; Lüthi, M. und Weidmann, U.*: PULS 90 – Ein systemumfassender Ansatz zur Leistungssteigerung von Eisenbahnnetzen; ETR-Artikel, Nr. 03; Seite 104-107; März 2007.

# **Ein Verkehrssimulator zur Simulation des Kommunikationsaufkommens in einem satellitengestützten Mauterfassungssystem**

Karin Lunde, Florian Mast  
{k.lunde, fmast}@hs-ulm.de  
Institut für Informatik, Hochschule Ulm  
Prittwitzstr. 10, 89075 Ulm

## **Kurzfassung**

Ziel unserer Untersuchungen ist die ereignisbasierte Simulation der Kommunikationsvorgänge in einem flächendeckenden automatisierten Mauterhebungssystem mit satellitengestützter Positionierung der Fahrzeuge. Um diese Simulation anzutreiben, benötigen wir Trajektorien der mautpflichtigen Fahrzeuge über das Streckennetz, die deren Fortbewegung bezüglich summarischer Kenngrößen wie Durchschnittsgeschwindigkeit und Verkehrsfluss möglichst gut modellieren und jeweils einem individuellen Fahrzeug zuzuordnen sind. Der Artikel stellt einen effizienten und leicht parallelisierbaren Algorithmus vor, der Trajektorien als Zufallspfade auf dem als gerichteten Graphen repräsentierten Streckennetz berechnet. Es werden erste Ergebnisse eines Projektes diskutiert, das am Beispiel eines Mautsystems auf dem Autobahnnetz in Deutschland durchgeführt wurde und in dessen Rahmen die erzeugten Trajektorien als wesentliches Zwischenresultat für die eigentliche Systemsimulation genutzt werden.

## **1 Einleitung**

Im Januar 2005 wurde in Deutschland ein flächendeckendes automatisiertes Mauterfassungssystem eingeführt, das auf der Positionsbestimmung der Fahrzeuge durch Navigationssatelliten (GPS) beruht. Der hier vorgestellte Verkehrssimulator dient zur Generierung von Routen, die von mautpflichtigen Fahrzeugen zurückgelegt werden und die als Eingangsdaten für die Simulation des Kommunikationsaufkommens in einem solchen automatisierten Mauterfassungssystem genutzt werden. Kommunikation findet während der Fortbewegung der Fahrzeuge über das Straßennetz aus den unterschiedlichsten Gründen statt, zum Beispiel zur Abwicklung der Abrechnungsprozesse, zur Aktualisierung der im Fahrzeug vorhandenen Kartendaten oder der Software selbst. In der Regel werden die Daten über Mobilfunknetze ausgetauscht. Die Häufigkeit und der Umfang dieser Kommunikation, in Abhängigkeit von den verwendeten Strategien, sind der Hauptgegenstand unserer Untersuchungen, die am Beispiel des deutschen Autobahnnetzes und des hier etablierten satellitengestützten Mauterhebungssystems durchgeführt werden. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist der Speicherplatz, der für diese Prozesse in jedem individuellen Fahrzeug bereitgestellt muss. Durch die Simulation sollen Kosten für den Betreiber minimiert und Risiken evaluiert werden, indem beispielsweise die Auswirkungen eines teilweisen Ausfalls wesentlicher Ressourcen wie Zentralrechner oder Kommunikationsnetz analysiert werden.

Die Kommunikationssimulation basiert auf diskreten Events (siehe [1]); als Simulationswerkzeug benutzen wir Omnet++ (vorgestellt in [8]). Events sind solche

Ereignisse, die den Status eines Fahrzeugs bezüglich der relevanten Größen verändern. Aufgabe des Verkehrssimulators ist es, Trajektorien der mautpflichtigen Fahrzeuge über das Straßennetz zu generieren und daraus zeitlich geordnete Listen von Events (jeweils mit Zeitstempel und geografischer Position) zu erzeugen, der Form

- OBU <OBU\_ID> in bzw. aus Mautsegment <SEG\_ID> ein- bzw. ausgefahren;
- OBU <OBU\_ID> aktiviert bzw. deaktiviert (Zündschlüssel).

Diese Eventlisten bilden die abstrakte Schnittstelle zur Kommunikationssimulation. OBU steht hier für *on-board unit*, also den Bordrechner, der auf jedem mautpflichtigen Fahrzeug vorhanden ist, das an der satellitengestützten Mauterhebung teilnimmt. Nach Angaben des Betreibers [7] werden mittlerweile über 90% der Mautbuchungen im automatischen Verfahren abgewickelt; 650.000 OBUs sind registriert.

In diesem Beitrag sollen der Algorithmus zur Erzeugung der Routen von Fahrzeugen auf dem Straßennetz und einige Simulationsergebnisse vorgestellt, sowie die Grenzen und Vorteile des Verfahrens diskutiert werden.

## 2 Die Verkehrssimulation

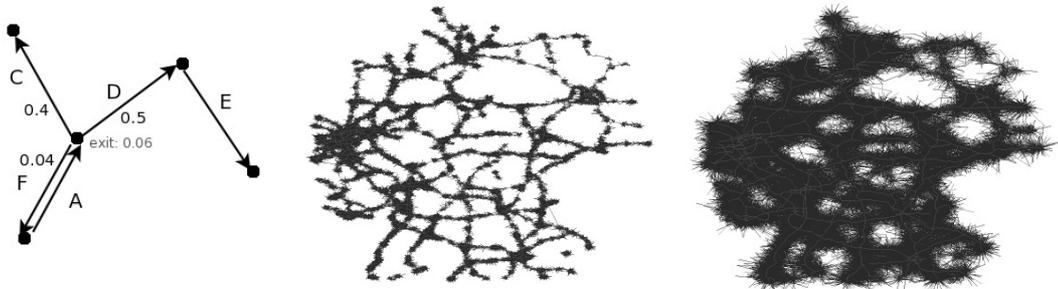
Einen Überblick über Ansätze zur Verkehrssimulation geben Brilon et al. in [4], wie auch Flötteröd in [5]. Mikroskopische Ansätze modellieren jeden Verkehrsteilnehmer und sein Verhalten und sind naturgemäß aufwendig, aber gut geeignet, um lokale Phänomene zu analysieren, die auf der Interaktion zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmern beruhen. Makroskopische Ansätze sehen hingegen vom Individuum ab und nutzen Modelle aus der Strömungslehre, um summarische Phänomene wie Verkehrsflüsse oder Durchschnittsgeschwindigkeiten zu beschreiben. Beide Ansätze lassen sich kombinieren in Form mesoskopischer Verfahren (zum Beispiel [6], [3]), wobei der Fokus häufig auf der Verbesserung der Performance bei gleichzeitiger Mikro-Modellierung in bestimmten lokal begrenzten Problemgebieten liegt.

Die abstrakte Schnittstelle würde es leicht erlauben, aus dem Ergebnis einer mikro- oder mesoskopischen Verkehrssimulation die benötigten Eventlisten zu erzeugen. Dagegen spricht jedoch der hohe Aufwand. Für die Simulation des durch Akkumulation von Kartendaten verursachten Speicherbedarfs und Kommunikationsaufkommens sind Trajektorien mit einer großen geografischen Reichweite wesentlich. Um dabei den stationären Zustand zu erreichen, streben wir einen Simulationszeitraum von 4-12 Wochen an. Diese zeitlichen und geografischen Anforderungen sprechen für eine makroskopische Simulation. Andererseits müssen jedoch für die eventbasierte Simulation Trajektorien für jedes individuelle Fahrzeug vorliegen. Aus diesen Gründen haben wir einen vergleichsweise einfachen Algorithmus gewählt, der die Bewegung eines einzelnen Fahrzeuges über das mautpflichtige Straßennetz in Form eines Random Walks verfolgt, unter Verwendung von Verzweigungswahrscheinlichkeiten, die sich aus den Verkehrsflüssen ergeben. Die entstehenden Zufallspfade auf dem Streckennetz werden als Trajektorien der mautpflichtigen Fahrzeuge interpretiert und daraus, zusammen mit Annahmen über die Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die benötigten Events berechnet.

Das mautpflichtige Netz wird durch einen gerichteten Graphen repräsentiert, in dem die Kanten Autobahnsegmenten und die Knoten den Abfahrten entsprechen. Alle Kanten, die von einem Knoten ausgehen, sind mit Verzweigungswahrscheinlichkeiten markiert,

die zum Würfeln der nächsten zu durchfahrenden Kante benutzt werden können (Bild 1, links). Der Graph des deutschen Autobahnnetzes (siehe [2]) umfasst etwa 5000 Kanten und doppelt soviele Knoten; das nachrangige Streckennetz ist nicht Bestandteil dieses Modells.

Wesentlicher Parameter des vorgestellten Modells ist die sog. Häufigkeitsverteilung der Tourstartzeitpunkte über eine Woche. Sie wird derart angenommen, dass sie an den Wochentagen einen Tagesgang mit verminderter Aktivität während der Nächte und eine stark zurückgehende Aktivität am Wochenende, insbesondere am Sonntag, modelliert. Zusätzlich gehen in das Modell Annahmen über die Häufigkeitsverteilung der Tourstarts pro Autobahnsegment ein. Beide werden genutzt (zusammen mit Annahmen über zeitliche und geografische Zusammenhänge zwischen aufeinanderfolgenden Routen), um die Startzeitpunkte und Startsegmente für Routen einer OBU zu generieren. Ausgehend vom Startsegment wird sodann der Random Walk über das Autobahnnetz durchgeführt, gemäß den Verzweigungswahrscheinlichkeiten im gerichteten Graph, die damit weitere Modellparameter bzw. -annahmen darstellen.



**Bild 1:** Autobahnsegmente mit Verzweigungswahrscheinlichkeiten (links); Vergleich der Flächenabdeckung bei verschiedener Wahl des Geschwindigkeitsparameters außerhalb des mautpflichtigen Netzes (Mitte:  $v_{\text{avg}} = 5 \text{ km/h}$ , rechts:  $v_{\text{avg}} = 20 \text{ km/h}$ ).

Neben dem Verhalten der Fahrzeuge auf dem mautpflichtigen Netz spielt für die Kommunikationssimulation auch der (für einen Großteil der LKWs zunächst als vergleichsweise kurz angenommene) Zeitraum eine Rolle, während dessen die OBU zwar bereits aktiviert ist, sich jedoch noch auf dem nachrangigen Straßennetz befindet. Während dieses Zeitraums kann sich zwar der mautrelevante Zustand des Fahrzeugs nicht ändern, aber es kann beispielsweise Kommunikation im Zusammenhang mit Softwareupdates oder dem Update der Karteninformation stattfinden. Aus diesem Grund wurde der Random Walk über das mautpflichtige Netz ergänzt durch ein stark vereinfachendes Modell des Fahrzeugverhaltens zwischen Aktivierung der OBU und Auffahrt auf die Autobahn einerseits und Abfahrt von der Autobahn und Deaktivierung der OBU andererseits. Hier fließen Annahmen über die Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge und über Pausenzeiten der Fahrer mit ein. Einen Vergleich der Flächenabdeckung der simulierten Routen für verschiedene Durchschnittsgeschwindigkeiten  $v_{\text{avg}}$  außerhalb des mautpflichtigen Netzes findet man in Bild 1.

Das so definierte Modell wird auf zwei Ebenen validiert. Zum einen werden die statistischen Eigenschaften von generierten Routen mit analytisch direkt aus den Modellparametern ableitbaren Erwartungen verglichen, zum anderen mit zugänglichen

Verkehrsstatistiken. Grundsätzlich sind Abweichungen bei der Verkehrsverteilung im Netz sowie bei Tourenlängen zu erwarten, da der Algorithmus keinerlei Start-Ziel-Planung mit einbezieht, sondern an jeder Ausfahrt lokal entscheidet, wie die Route fortgesetzt und ob sie beendet werden soll. Abhilfe könnte die Modellierung mehrerer Ensembles mit verschiedenen Eigenschaften schaffen, z.B. Transitverkehr mit sehr langen Routen, Inlandsverkehr mit mittellangen und lokaler Verkehr mit kurzen Routen. Die Modellparameter (Häufigkeitsverteilungen und Verzweigungswahrscheinlichkeiten) müssten dann für jedes Ensemble separat modelliert werden.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die simulierten Trajektorien zwar nicht repräsentativ für das Verhalten einzelner Fahrzeuge sind, jedoch wichtige summarische Kenngrößen wie mittlere Durchfahrtsfrequenzen der Autobahnsegmente auf dem mautpflichtigen Streckennetz mit ausreichender Genauigkeit wiedergeben und als Treiber für die Kommunikationssimulation geeignet sind. Der Algorithmus gestattet die Implementierung als verteilte Anwendung, was die Erzeugung von Routen für bis zu einer Million Fahrzeuge über einen langen Simulationszeitraum (in der Regel 4-12 Wochen) erlaubt. Eine Einbeziehung von Interaktionen der mautpflichtigen Fahrzeuge untereinander oder mit anderen Verkehrsteilnehmern ist mit dem geschilderten einfachen Ansatz nicht möglich. Die Schnittstelle zur Kommunikationssimulation ließe es zu, die benötigten Eventlisten alternativ aus einer mikro- oder mesoskopischen Verkehrssimulation zu erzeugen. Ein solcher Vergleich von verschiedenen Abstraktionsgraden bei der Verkehrsmodellierung wäre für die Zukunft sehr interessant.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Industrieprojekts *Systemsimulation Automated Toll Detection* durchgeführt, das von der Satellic Traffic Management GmbH gefördert wird. Wir danken insbesondere unseren Domänenexperten Dr. Marc-André Funk und Dr. Uwe Leinberger<sup>†</sup> für zahlreiche stimulierende Diskussionen.

### 3 Literatur

- [1] *Banks, J.*: Discrete-Event System Simulation. Prentice-Hall, 2004.
- [2] *Bundesanstalt für Straßenwesen*: Mauttabelle. [www.mauttabelle.de](http://www.mauttabelle.de) (10.7.09).
- [3] *Burghout, W. and Koutsopoulos, H. and Andreason, I.*: A discrete-event mesoscopic traffic simulation model for hybrid traffic simulation. ITSC, 2006.
- [4] *Brilon, W. and Huber, F. and Schreckenberg, M. and Wallentowitz, H.*: Traffic and Mobility. Springer, 1999.
- [5] *Flötteröd, G.*: Traffic-State Estimations with Multi-Agent Simulations. Dissertation TU Berlin, 2008.
- [6] *Flötteröd, G. and Nagel, K.*: High speed combined micro/macro simulation of traffic flow. ITSC, 2007.
- [7] *TollCollect*: Vier Jahre LKW-Maut in Deutschland. Pressemitteilung vom 19.12.08. <http://www.toll-collect.de> (5.7.09).
- [8] *Varga, A. and Hornig, R.*: An overview of the Omnet++ simulation environment. In Proceedings of Simutools'08. Rom, 2008.

# **Agent-based Discrete Event Simulation of a Community-based Financial Portfolio for Business Development**

<sup>1</sup>Ernest Fongwa, <sup>2</sup>Oana Nicolae, <sup>2</sup>Mircea Diaconescu, <sup>1</sup>Albrecht Gnauck  
and <sup>2</sup>Gerd Wagner

enibks@yahoo.co.uk, nicolae@tu-cottbus.de, M.Diaconescu@tu-cottbus.de,  
Albrecht.gnauck@tu-cottbus.de, G.Wagner@tu-cottbus.de

<sup>1</sup>Brandenburg University of Technology at Cottbus-Germany, Chair of Ecosystems and  
Environmental Informatics, Konrad-Wachsmann-Allee 1, 03046, Cottbus

<sup>2</sup>Brandenburg University of Technology at Cottbus-Germany, Chair of Internet-  
Technology, Walther-Pauer Str. 3, 03046, Cottbus

## **Abstract**

The paper discusses conceptualization issues and the implementation of a simulation model that envisions a community-based financial portfolio, which can be used by business developers as a decision support system for financing businesses. Financial systems are types of Business Processes that usually involve making investment decisions, planning and/or financial transactions. Financial source for business development is conceptualized into a financial participation model for financial portfolio at the level of the community with the focus on the relationship between financial contribution and profit sharing. A simulation capability enables a range of alternative scenarios with the purpose of reducing the costs of system implementation and, at the same time, improving the quality of the delivered system. A simulation model involving an agent-based Discrete Event Simulation approach has been developed and tested with the help of the Entity-Relationship /Agent-Object-Relationship (aka ER/AOR) simulation framework.

## **1 Introduction**

The global economic crisis today can be attributed to failure in the financial system to sustain businesses. This is because most businesses have been depending on financial institutions for their sustainability. Majority of businesses especially Small and Medium Enterprises (SME) depend on loans from financial institutions for financing (Krishnam, 2006). Many literatures on corporation financing considered such source of financing the roadblock to sustainability of businesses because it carries a lot of liabilities (Baydas et al, 1996; Krishnam, 2006). Many businesses have been using liability capital (loans) for financing, which has not been easy for them working with such form of financing. Therefore, there is the need for alternative sources of financing, which is very challenging.

Financial participation (FP) from the community level can play a vital role in providing finance for businesses, especially for those businesses developing from community initiatives. FP requires cooperation with all stakeholders in the community to pull financial portfolio for investment in businesses and allowing them (stakeholders) to benefit in the results (profits) of the business according to their contributions (Distributive justice and corporate social responsibility). Therefore FP is conceptualized and the relationships within financial contribution and profit sharing are simulated in a framework to predict system behaviour and optimisation.

On the implementation point of view, the existing literature reports many perspectives (i.e. methodologies and techniques) regarding business process simulations and their distinct roads of development. Discrete Event Simulation (DES) is a well known method of business process simulation in which time is moved forward in discrete steps of differing durations from one event to another. It is best tailored for simulating business processes as workflow systems due to the fact that it naturally provides the ordered queue of scheduled events that triggers the execution of appropriate activities.

One considers agent-based DES paradigm to be suitable for simulation modelling, as it assumes some basic abstractions such as: community agents, their interactions (e.g. possible acts of communication) and the organisations, on behalf they are acting. As a case study, a simulation model that has been developed in order to simulate a community-based Financial Portfolio is presented. Financial systems are considered as a particular case of business processes. They usually involve a workflow queue of activities which need to be performed, often prioritised in a set order according to the business scheduled events, a communication system for activities and messages between involved agents and the statistics metrics intended to help the business analysts.

The implementation solution is obtained by using the open-source Entity-Relationship/Agent-Object-Relationship (ER/AOR) simulation framework, which is an ontologically well-founded DES framework with a high-level rule-based simulation language and an abstract simulator architecture and execution model available in <http://www.AOR-Simulation.org>. The simulation framework proposed in (Wagner, 2004) supports both basic DES without agents: ER (Entity-Relationship) and complex agent-based simulations with (possibly distorted) perceptions and (possibly false) beliefs: AOR. The simulation scenario is expressed with the help of the XML-based ER/AOR Simulation Language (ERSL/AORSL). The scenario is then translated to executable code, compiled to Java byte code and finally executed as in figure 1 below.



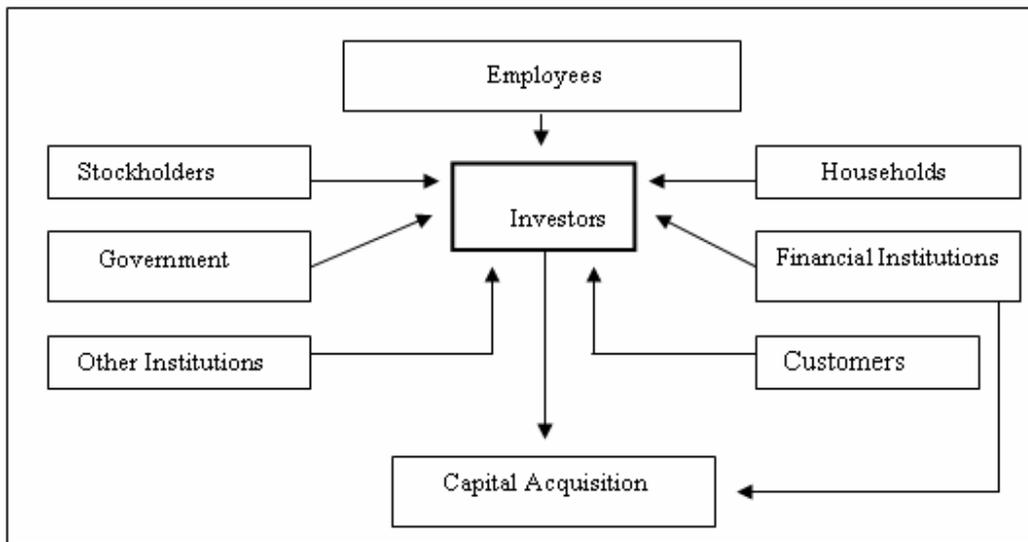
**Figure 1:** Java code generation.

The *simulation scenario* consists of a *simulation model*, an *initial state* definition and zero or more *view* definitions. The *simulation model* consists of: (1) an optional *space model* (needed for objects/agents); (2) a set of *entity type* definitions, including different

categories of *event*, *message*, *object* and *agent* types; and (3) a set of *environment rules*, which define causality laws governing the environmental state changes.

## 2 Conceptualization of a community-based Financial Portfolio

The community contains various groups of stakeholders that can be brought together to pull financial portfolio through cooperation and participation. This is being conceptualized on Figure 2 below. The incentive and motivation for cooperation and participation can be explained from the prospective of game theory and the need for businesses to use their own financial resources in which the community is a potential area of consideration. This lies on the potential benefits that will be attained from cooperative game that outweighs losses from non-cooperative games and providing an optimum strategy than a mini-max strategy that is very risky and can lead to losses. More so, financial portfolio from the community can rescue a business from the apex in which financial institution role businesses. Figure 2 represents a conceptual diagram of financial portfolio that can be attained at the level of the community; it shows different stakeholder groups within the community level becoming investors through cooperation and participation to provide capital acquisition for investment.



**Figure 2:** Conceptual diagram of Community-based Financial Portfolio.

The community stakeholders are categorized into two groups for simulation of community-based financial portfolio, which are the investor group (which may comprise: stockholders, households, customers, financial institutions or the government) and the employee group that is a special group of investor in the simulation model. This is because the employees start investing only when the business start operation, but provide a monthly contribution to business capital. The reason is that they need to have an active

stake in the business, since they are involved in the day to day activities of the business and without that they might act as free riders.

At the initial stage of equity formation, capital acquisition comes only from the investor group, which may be in the form of intangible assets, financial assets or fixed assets, while that of the employee group is zero. The employees only start investing in the first month after the business start operation with a fixed percentage of their earnings. Both the employees group and the investor group have stock in the business and they make this investment based on the fact that the return to their investment is greater than the percentage of interest rate from financial institutions. For input data specification, there is the assumption that a market analysis have been carried out to show the viability of the business. The formal validation and verification of the simulation model is based on the values of input/output data from *Cottbus-Saspow Landfill Gasification Project*. The simulation is being tested with the input data from the landfill project by performing many simulation runs for a specified time interval, which the output results were compared with that of the output data from the landfill project and the variance was insignificant. To verify and proof the validity of the simulation the time weighted statistics and probability produced in the simulation runs were analyzed and compared to verify whether the type of probabilities generated correspond to the real cumulated distribution of the statistics.

The simulation is performed by defining variables (inputs) to obtain output values that show the simulation behavior over time based on the specified relationship within the various stakeholders. This is done using the concept of entrepreneurial behavior in a similar way as in business capital (Johanisson, 1988; Bordieu, 1983), in which investment capital is being conceptualized as contribution from various stakeholders within the community. In other words, contributions for investment (X) in the community-based financial portfolio are given by:

$$X = I + \text{Emp} \pm \beta \quad (1)$$

Where I is contribution from investors comprising of many investors from the community ( $I_n$ ), that is  $I_1$  to  $I_6$  being stockholders, government, other institutions, households, financial institutions (banks) and customers. Therefore  $I = \sum_{i=1}^n (I_i; I_n)$ . EMP is contribution from employees, while  $\beta$  are disturbance. The capital acquisition (K) for the community financial portfolio is given by:

$$K = I + \text{Emp} + L \pm \beta \quad (2)$$

Where L is loan from financial institutions and the capital formation is being simulated from when the business starts operation to 12 month, then over a number of years based on parameter specifications. The time dynamics is a discrete event (month and year). The profit (Y) of the simulation system is given by:

$$Y = (E - L) \pm \beta \quad (3)$$

Where E is the business earnings that it is used to simulate the profit (Y) over the years within given parameter specification. The parameter specification is used to observe the behavior and the system dynamic of the simulation over time based on the output values, which could be used for parameter estimation for decision support systems on

community-based financial portfolio. The following parameter specifications are given within the simulation framework: (1) Emp starts contributing from the second month after operation and continues with a fixed percentage of their salaries, (2) Changes in capital (due to Emp contribution, changes in investment and retention profit), (3) for participation in the financial portfolio: the rate of profit must be greater than the rate of interest from bank investment, (4) the rate of profit sharing within the various groups of capital formation is according to the proportion of their cumulated contribution to capital formation and (5) a certain specified amount of profit is retained over the years, which increase the level of capital (Capital accumulation). The relationships are being established using simple algorithm as a modeling and simulation procedure that can enable the writing of the program language to run the simulation on a simulation platform (Zeigler, 1976).

The parameter specification is important in the modeling procedure to monitor and predict the system dynamics for parameter estimation in order to optimize the system and produce simulation results that could show almost the real picture of the community-based financial portfolio.

### 3 Implementation of the Financial Portfolio Test Case

The implementation process is based on the presentation of the relations and parameters of figure 1 in which the simulation model is formalized in terms of AORS constructs. An AORS entity type is defined by sets of properties and functions.

There are two kinds of properties: attributes and reference properties. Attributes are properties whose range is a data type; reference properties are properties whose range is another entity type. The upper level ontological categories of ER/AOR Simulation are objects (including agents, physical objects and physical agents), messages and events. According to this upper-level ontology of ER/AOR Simulation, agents are special objects. For simplicity it is common, though, to say just object instead of using the unambiguous but clumsy term non-agentive object. Both the behavior of the environment (i.e. its causality laws) and the behavior of agents are modeled with the help of agent rules, which support high-level declarative behavior modeling.

In the Financial Portfolio simulation model the following entity types are used:

- *Agent types* such as: Company and Investor (with its sub-type Employee).  
An *agent type* is defined by means of: (1) a set of (objective) properties and (2) a set of *communication rules*, which define the agent's reactive behavior in response to events (caused and internal time events) and/or messages.
- *Event types*: exogenous events (End of Month, End of Year).  
The events trigger the system's appropriate environment rules and thus, influence the behavior of the system.
- *Message types* that the Company and the Investors exchange i.e. at the end of each month (1) the Company pays the employees salaries (PaySalary message type); (2) the employees receive their salary and invest a percent from it (Invest message type); at the end of each year; and (3) the Company distributes the annual profit to the investors based on their current contribution: (DistributeProfit message type).

The state of the environment (i.e. the system state) is given by the combination of the states of all objects. Also time weighted statistics variable are calculated: (1) company capital; (2) company profit; and (3) employee investment. Their values express the average amount over some period of time.

### **3.1. ER/AOR Simulation Framework**

The ER/AOR simulation model consists of: (1) an optional space model (needed for physical objects/agents); (2) a set of entity type definitions, including different categories of event, message, object and agent types; (3) each agent type may involve a set of agent rules representing its message interactions; (4) each agent may be responsible for the execution of a set of activities; (5) agents may have a mental structure in form of beliefs; and (6) a set of environment rules, which define causality laws governing the environmental state changes.

The ER modeling involves entities, their classification by means of entity types, domain relationships between entities and their classification in relationship types. ER object-orientation capability allows domain independent relationships between entity types such as: generalization and aggregation, and provide the entity types with the characteristic of having complex attributes.

Our DES-based ER Simulation deals only with two basic categories of entities: *objects* and *events*. A simulation model defines a number of object types and event types, each of them with one or more properties and zero or more functions (to be used for all kinds of computations such as for computing pseudo-random numbers following an empirical distribution). Among the event types, we distinguish those that define exogenous events (that may have some random periodicity) and those that define caused events that are the result from the occurrence of other events.

The environment rules define how the state of objects is changed by the occurrence of events. An environment rule is a 6-tuple <WHEN, FOR, DO, IF, THEN, ELSE> where: (1) WHEN denotes the type of event that triggers the rule; (2) FOR is a set of variable declarations, such that each variable is bound either to a specific object or to a set of objects; (3) DO represents the update of environment states that implicitly is performed; (4) IF is a logical formula allowing for variables and possible expressing a state condition; (5) THEN holds is the IF condition is evaluated to true and specifies an update of the environment state together with a list of resulting events to be created; and (6) ELSE holds is the IF condition is evaluated to false and also specifies an update of the environment state together with a list of resulting events to be created when the rule is fired.

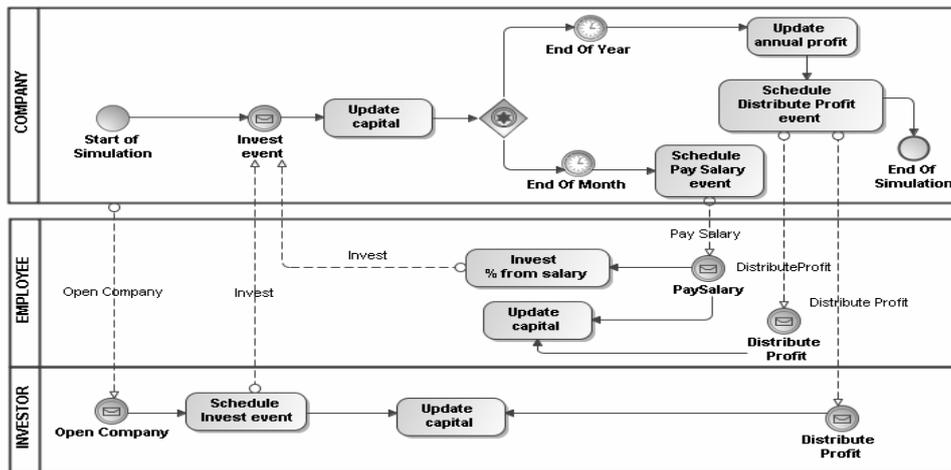
### **3.2. Business Process Modeling using BPMN Standard**

Business Processes (BP) are becoming some valuable assets for the actual industry landscape. Business Process Management (BPM) solutions simplify the modeling, designing, monitoring and enactment of complex processes based on decision making. As an answer to the necessities of inter-operability and standardization (i.e. an unique way of understanding the description of business processes both at the design and at the implementation/enactment levels), Business Process Modeling Notation (BPMN, 2009) was developed by OMG having as target the actual business market. The main objective

of modeling the business processes is ensuring them consistency and rigor. The aim of BPMN is to provide a notation that is easily understandable by all business users, from the business analysts which create the initial drafts of the processes, to the technical developers responsible for implementing the technology that will perform those processes, and finally, to the business people who will manage and monitor them. BPMN is not an executable language, but a notation. OMG has standardized its graphical symbols and the translation to an executable language as OASIS's BPEL (Service Oriented Architecture - SOA approach) or an agent-based simulation language (Multi Agent System - MAS approach) come to enhance the BPMN diagram representation with a particular semantic in what regards the enactment.

Simulation Modeling or business process simulation is the new road in the business literature and its usage applies to different topics such as: financial planning by quantifying the impact of the business decisions; risk management by determining, measuring and managing the balance between profitability and certain types of risks; forecasting by analyzing historical data and using it to predict future scenarios and business processes modeling.

Figure 1 below is the BPMN diagram representation of the community-based financial portfolio in a business process. The horizontal rectangles in BPMN terminology are pools (e.g. Company) and pools that are identified by two or more lanes (e.g. Investor and Employee). They are used to identify certain classes (types) of active resources (actors/performers) in the simulation. Therefore, the Employee lane subsumes the employee instances of the Employee agent type in the AORS implementation. The BPMN events ontology comprises: start events, intermediate events and end events, each of them can be simple, carrying a message represented by the envelope symbol (e.g. DistributeProfit, PaySalary), timers having the clock symbol (e.g. DistributeProfit, PaySalary), timers having the clock symbol (e.g.



**Figure 3:** BPMN 1.2 diagram – The workflow inside of the Financial Business Process.

End of Month, End of Year), whose semantics denotes the delay until the next activity is performed etc. The tasks – soft rectangles represents atomic activities (the work that is

done) inside the workflow (e.g. Update capital). They represent the updates of the system state (agents and environment) or scheduling of events as part of the communication procedure (e.g. Schedule Pay Salary event). The gateways (diamond symbol) are used in order to control the flow of activities and events. The example above uses an event-based gateway whose semantics is specified by the literature as deferred XOR-split: a point in a process where one of several branches is chosen based on interaction with the operating environment. The workflow order or precedence is showed by using sequence flow arrows (they imply token flow semantics inspired by Petri nets, where "token" is just a general term for control and data values). The message flow arrows describe the communication between business partners and also comply with token semantics (there is an order of the messages).

### 3.3. ER/AOR Test Case Implementation

Model Driven Architecture (MDA) introduces a set of basic concepts such as: model, meta-model, modeling language and transformation. Following MDA approach one can notice that this work respects its division layers i.e. (1) abstract business process modeling belongs to the Computational-Independent Model (CIM - domain model or business model) e.g. business process meta-model provided by BPDM (BPDM, 2008) specification; (2) also Platform-Independent Model (PIM) is used to describe a system: it is more specific and lower-level e.g. BPMN (graphical notation); and (3) Platform-Specific Model (PSM) deals with the enactment and includes software implementation details e.g. ERS/AORS or BPEL (BPEL, 2007) implementations.

The simulation capability allows one to experiment with a model in order to understand its behavior under different scenarios. The financial portfolio model, under AORS implementation, allows for different scenarios (which involves different basic level input data) to be tested on the model. The simulation procedure implies (1) the development of the BPMN business model; and (2) its repeatedly enactments that finally allow for statistic variables computation.

Each ER/AOR simulation scenario is syntactically validated against its XML schema (now at 0.8 version):

```
<SimulationScenario version="0.8"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://aor-simulation.org../../../../ext/aorsl/
    AORSL-0-8.xsd" xmlns="http://aor-simulation.org"
  xmlns:aors="http://aor-simulation.org"
  xmlns:dc="http://purl.org/dc/elements/1.1/"
  scenarioName="FinancialService" scenarioTitle="Financial Service"
  simulationManagerDirectory="../../..">
  ...
</SimulationScenario>
```

The simulation parameters involve the number of steps while the simulation is run each time (one year) and the unit measure of the simulation steps (D from day):

```
<SimulationScenario>
  <SimulationParameters simulationSteps="365" timeUnit="D"/>
  ...
</SimulationScenario>
```

The <EntityTypees> element comprises the definitions of event types that can be scheduled and triggered, the declarations of the message types that are supposed to be

exchanged between the business partners and the agent types (the actors that are the active resources of the simulation) together with their attributes and/or properties, internal periodic events and/or communication rules:

```
<EntityTypes>
  <MessageType name="Invest">
    <Attribute type="Float" name="amount"/>
  </MessageType>
  <MessageType name="PaySalary">
    <Attribute type="Float" name="amount"/>
  </MessageType>
  <ExogenousEventType name="StartOfSimulation">
    <Periodicity language="Java">0</Periodicity>
  </ExogenousEventType>

  <!-- The company that will be founded and managed. -->
  <AgentType name="Company">
    <Attribute type="Float" name="capital"/>
    <Attribute type="Float" name="profit"/>

    <CommunicationRule name="Invest_Rule" agentVariable="agt">
      <WHEN eventType="InMessageEvent" messageType="Invest"
        messageVariable="mess"/>
      <UPDATE-AGT>
        <Slot property="capital" xsi:type="aors:OpaqueExprSlot">
          <ValueExpr language="Java">
            agt.getCapital() + ((Invest)mess).getAmount()
          </ValueExpr>
        </Slot>
      </UPDATE-AGT>
    </CommunicationRule>
    ...
  </AgentType>
  ...
</EntityTypes>
```

The agent internal events are responsible for defining important events with regards to the agent behavior, that are triggered at a specific time (that is mentioned at the initialization state of the simulation scenario) and having certain periodicity. For example, an internal periodic event of a `Company` agent type that is triggered each month is simulated in a simulation scenario with the simulation parameter unit: month (m), the succession of years.

In the code snippet above, the `Company` agent type has defined a communication rule that is triggered by the `Invest` message type. Receiving a message means that the instance of a `Company` type perceives an event of a certain type `InMessageEvent` that carries with itself a certain message of type `Invest` that is defined to have a certain internal structure, its attributes or properties. As a consequence of receiving this message, the `Company` agent updates its state: the `capital` attribute.

## 4. Conclusions

Business processes represent important assets for any organization, especially the financial process. The simulation capability allows an experiment of community-based

financial portfolio under different scenarios within a model in order to understand its behavior for decision support systems for its practical application. The enactment is not anymore the final-must for an organization process modeling. What is desirable is a facile and intuitive graphical support for simulation framework. The usage of standardized languages (BPMN) that assures interoperability and open-source tools are envisioned in the academia. We proposed an implementation solution for the community-based financial portfolio by using the open-source ER/AOR simulation framework, which is an ontologically well-founded DES framework with a high-level rule-based simulation language and an abstract simulator architecture and execution model.

## 5. References

- [1] *Baydas, M. M., Meyer, R..L. and Aguilera, N.A.*: “Credit Rationing in Small-Scale Enterprises: Special Micro enterprise Programs in Ecuador” *The Journal of Development Studies*, (1994), volume 31 (4): 279–309.
- [2] *Bordieu, P.*: Forms of Capital. In: Ricardon, J. (Ed.), *Handbook of Theory and Research for the Sociology of Education*. Greenwood Press, New York (1983), pp.241-258.
- [3] ER/AOR Simulation Framework - <http://www.AOR-Simulation.org> Last date of access 20.07.2009
- [4] *Johanisson, B.*: Business Formation: a network approach. *Scand. J. Manage.* (1988), 4(314), 83-99.
- [5] *Krishnam V. S.*: Study guide for use with principle of corporate finance. The Mc Graw-Hill Companies (2006).
- [6] *(OASIS)*: Business Process Execution Language 2.0, (BPEL 2.0) (2007), <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.html> Last date of access 20.07.2009
- [7] *(OMG)*: Business Process Definition Metamodel 1.0, (BPDM 1.0) (2008), <http://www.omg.org/spec/BPDM/1.0/> Last date of access 20.07.2009
- [8] *(OMG)*: Business Process Modeling Notation 1.2, (BPMN 1.2), (2009), <http://www.omg.org/docs/formal/09-01-03.pdf> Last date of access 20.07.2009
- [9] *Wagner G.*: AOR Modeling and Simulation – Towards a General Architecture for Agent-Based Discrete Event Simulation. In *Agent-Oriented Information Systems*, Lecture Notes in AI, (2004), volume 3030, 174–188. Springer-Verlag.
- [10] *Zeigler B. P.*: Theory of Modelling and Simulation. John Wiley & Sons, New York (1976).

# Extending Discrete Event Simulation by adding an Activity concept for Business Process Modeling and Simulation

<sup>1</sup>Oana Nicolae, <sup>1</sup>Gerd Wagner and <sup>1</sup>Jens Werner

Oana.Nicolae@tu-cottbus.de, G.Wagner@tu-cottbus.de, wernejen@tu-cottbus.de

<sup>1</sup> Brandenburg University of Technology at Cottbus-Germany, Chair of Internet-Technology, Walther-Pauer Str. 3, 03046, Cottbus

## Abstract

We show how a basic discrete event simulation language can be enabled for business process modeling and simulation by adding an activity construct. While activities are often not considered at all or not treated in a conceptually satisfactory way in the discrete event simulation literature, the great majority of business process modeling languages are based on a concept of activities. However, unlike a simulation language, the predominant business process modeling languages, including *UML Activity Diagrams* and the *Business Process Modeling Notation (BPMN)*, are not executable. So, the challenge for business process modeling is to define an executable semantics for activities, while the challenge for discrete event simulation is to find a way how to introduce an activity concept on top of the basic discrete event simulation concepts of *objects* and *events*. The main idea is to define an activity as a complex event having a *start event* and an *end event*. This idea is well-known from the business process modeling literature.

## 1. Introduction

In this paper we present a solution for modeling activities, and business processes, on top of the basic Discrete Event Simulation (DES) concepts of *objects* (or *entities*) and *events*. We develop our solution by extending an open source DES framework, called *ER/AOR simulation*, which is an ontologically well-founded agent-based DES framework with a high-level rule-based simulation language and an abstract simulator architecture and execution model available from [www.AOR-Simulation.org](http://www.AOR-Simulation.org). However, we argue that our approach is generic and could also be applied to other DES languages.

### 1.1 Activities in Discrete Event Simulation

In the DES literature, there is no agreement on how to define activities. This may be due to the fact that activities do not form a basic, but rather an advanced concept of DES.

Ingalls states in (Ingalls, 2008), that “Activities are processes and logic in the simulation” and that “There are three major types of activities in a simulation: delays, queues and logic”. For a business process modeler, these statements must sound enigmatic. In Business Process Modeling (BPM), they typically distinguish between process and activity, because they would never think that a delay or a queue is an activity,

but, for example, the business process can involve a queue of customers. What Ingalls really seems to mean is that in simulation the only relevant feature of many activities is the delay they create in the flow of events (for the sake of using a clear and ontologically faithful terminology, however, one should not classify a delay, or a queue, as an activity).

Greasley briefly describes some main execution control alternative in DES simulation systems (Greasley, 2000) including: event-based and activity-based approaches. He concludes with the fact that the most useful execution control approach to a DES simulation is the so called *3-phase approach* that combines the event-based and activity-based approaches (pp.18-19). The activities have a dependency with the events in the sense that an event can start an activity that has a duration (a random variable taken from a suitable distribution) and the system schedules the end event of the activity based on this duration. Despite the fact that the execution control is very well detailed, the activity semantics is not enough presented. But, we can deduce that the activities have a duration, are started by a conditional event (that checks some resource availability) and they have a scheduled end event (according with the activity duration) that is created by the system with the semantics of ending the activity.

We define activities as complex events having a start event, an end event, an optional association with an actor (being an agent that plays the role of a special resource) and zero or more associations with other objects playing the role of further resources used by the activity.

## 1.2 From Basic DES to Agent-Based DES

The *ER/AOR Simulation* framework was proposed in (Wagner 2004). It supports both basic discrete event simulations without agents, also called *Entity-Relationship (ER)* simulations, and complex agent-based simulations with agents having (possibly distorted) perceptions and (possibly false) beliefs, called *Agent-Object-Relationship (AOR)* simulations. A simulation scenario is expressed with the help of the XML-based *AOR Simulation Language (AORSL)*. The scenario is then translated to Java source code, compiled to Java byte code and finally executed.

A *simulation scenario* essentially consists of a *simulation model* and an *initial state*. An *ER simulation model* consists of: (1) a set of *entity type* definitions, including different categories of *event* and *object* types; and (2) a set of *environment rules*, which define causality laws governing the state changes of the environment and the flow of event causation. An *AOR simulation model* consists, in addition, of a set of *message* types and *agent* types included in the entity type definitions.

An *entity type* is defined by means of a set of properties and a set of functions. There are two kinds of properties: attributes and reference properties. *Attributes* are properties whose range is a data type; *reference properties* are properties whose range is another entity type.

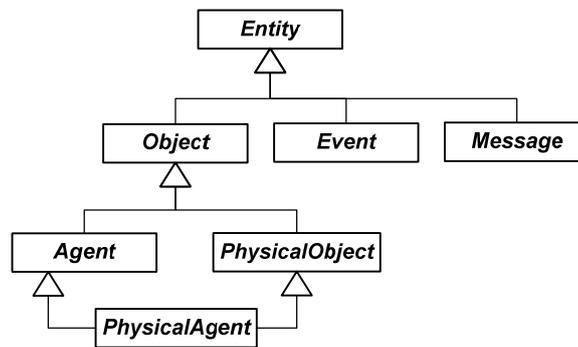
The upper level ontological categories of AOR Simulation are *objects* (including *agents*, *physical objects* and *physical agents*), *messages* and *events*, as depicted in Figure 3 (according to this upper-level ontology of AOR Simulation, agents are special objects; for simplicity it is common, though, to say just 'object' instead of using the unambiguous

but clumsy term ‘non-agentive object’). Notice that only objects, but neither events nor messages, have a state that may change over time.

Both the behavior of the environment (its causality laws) and the behavior of agents are modeled with the help of *rules*, which support *high-level declarative simulation modeling*.

### 1.2.1 Entity-Relationship Simulation

In basic discrete event simulation, we deal with two basic categories of entities: *objects* and *events*. A simulation model defines a number of object types and event types, each of them with one or more properties and zero or more functions (to be used for various kinds of computations such as for computing pseudo-random numbers following an empirical distribution). There are two different kinds of event types: those that define exogenous events (typically with some random periodicity) and those that define caused events that follow from the occurrence of other events.



**Figure 1: The upper-level ontological categories of ER/AORSL**

The state of the environment (i.e. the system state) is given by the combination of the states of all objects. Environment rules define how the state of objects is changed by (and which caused events result from) the occurrence of events.

An *environment rule* is a 6-tuple:

<WHEN, FOR, DO, IF, THEN, ELSE>

where: (1) WHEN denotes the type of event that triggers the rule; (2) FOR is a set of variable declarations, such that each variable is bound either to a specific object or to a set of objects; (3) DO represents the update of environment states and the scheduling of events that implicitly are performed; (4) IF is a logical formula allowing for variables and possibly expressing a state condition; (5) THEN holds is the IF condition is evaluated to true and specifies an update of the environment state together with a list of resulting events to be created; and (6) ELSE holds is the IF condition is evaluated to false and also specifies an update of the environment state together with a list of resulting events to be created when the rule is fired.

In each simulation step, all those rules are fired whose triggering event types are matched by one of the current events and whose conditions hold. The firing of rules may

lead to updates of the states of certain objects and it may create new future events to be added to the future events list. After this, the simulation time is incremented to the occurrence time of the next future event (if no continuous changes have been defined for the given model), and the evaluation and application of rules starts over.

### 1.2.2 Agent-Object-Relationship Simulation

When we introduce agents, we have to make further distinctions between different types of events. In particular, we need to consider perception events and actions events in order to account for the perception-action cycle defining the foundation of agent behavior.

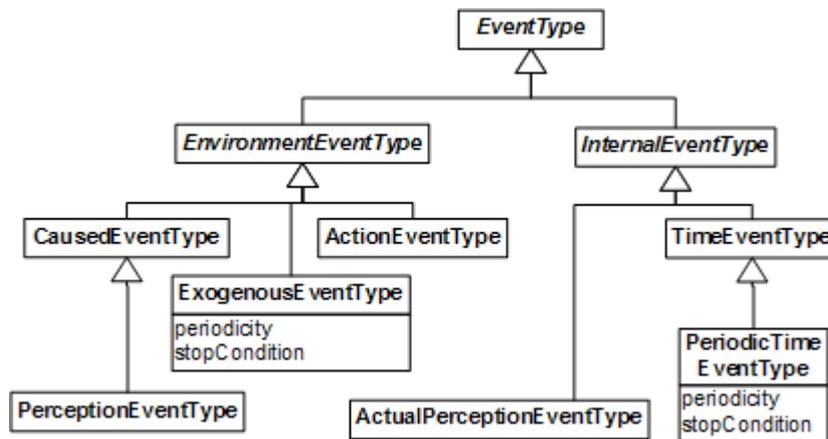


Figure 2: ER/AORSL Event type - categories

An agent type is defined by means of: (1) a set of (objective) properties; (2) a set of (subjective) self-belief properties as well as (3) an optional set of (subjective) belief entity types; and (4) a set of agent rules, which define the agent's reactive behavior in response to perception events (and internal time events).

### 1.3. Introduction to the Business Process Modeling Notation

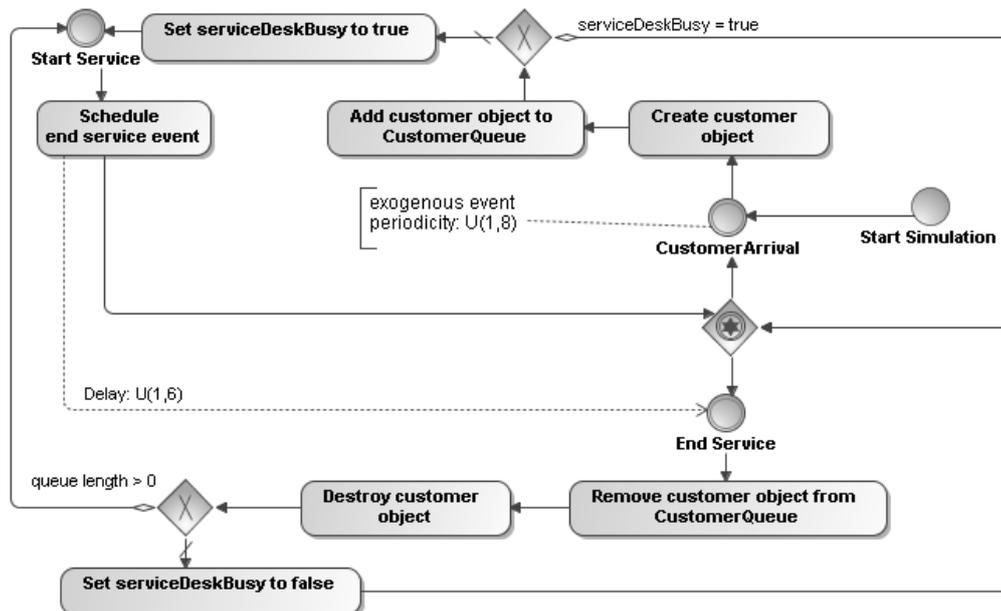
The *Business Process Modeling Notation* (BPMN - see its Specification document at <http://www.omg.org/spec/BPMN/1.2/>) has become today's de-facto BPM standard. BPMN is considered to be understandable by all kinds of users, from the business analysts who create the initial drafts of the business processes, to the technical developers responsible for writing the software applications that will perform those processes, and finally, to the business people who will manage and monitor them. BPMN can be used both for making intuitive, non-executable business process models and for making executable models, such as needed for business process simulation. In the sequel, we provide a brief description of the essential BPMN constructs.

BPMN defines *Business Process Diagrams (BPD)*, which may contain several *processes* of different types. We focus on the representation of private business processes, i.e. processes that allow a complete specification of their workflow. A process may be associated with a *pool*, which is visually rendered as a rectangular container and corresponds to the business actor “owning” the process. A pool may be compartmented into several *lanes* each representing a process part associated with a specific actor under the same domain of control. A process essentially consist of ‘flow objects’ (events, activities and gateways), ‘connectivity objects’ (sequence flows, message flows and associations) and ‘artifacts’ (e.g. data objects).

Events (rendered as circles) and activities (rendered as rectangles with rounded corners) are sequenced with the help of *sequence flows* (rendered as solid arrows) and *gateways* (rendered as diamonds), which allow for AND, XOR as well as OR splits and joins of event flow branches.

Activities subsume *tasks*, which represent *atomic activities* (defined with the help of the taskType attribute), and *sub-processes*. Tasks can be assembled into sub-processes, for allowing reuse. Pools are connected through *message flows* that represent business partner communication.

In the sequel we use BPMN as a simulation modeling language for expressing the process model that defines the flow of events. A full simulation model can be specified by combining an information model (e.g. a UML class model) with a BPMN process model.



**Figure 3: Modeling a Simple queue without Activities**

For the complete simulation model, please check out: [http://oxygen.informatik.tu-cottbus.de/aors/examples/Management/ServiceQueue\\_withoutActivities/scenario.xml](http://oxygen.informatik.tu-cottbus.de/aors/examples/Management/ServiceQueue_withoutActivities/scenario.xml).

## 2. Extending the ER/AORSL by Adding Activity Types

Activities are complex events having a start event, an end event, an optional association with an actor (being an agent that plays the role of a special resource) and zero or more associations with other objects playing the role of further resources used by the activity.

The activity construct binds the two events “*start activity*” and “*end activity*” implicitly together in a new construct that replaces them. This has the advantage of decreasing the complexity of the model: the event constructs and the four sequence flow arrows attached to them are being replaced by one activity construct and the two sequence flow arrows attached to it. This means that six modeling elements are replaced by three.

Associating the resources used with the activity allows the simulator to automatically compute the utilization statistics for these resource objects. For using activities in an ER/AOR simulation model, suitable activity types have to be defined within the *EntityTypes* container.

An *ActivityType* may define a start event type such that any event of that type triggers the creation of a new activity instance. If an *ActivityType* does not specify a start event type, then new activity instances may be created on the occurrence of an *ActivityStartEvent* with an *activityType* attribute value set to the name of the activity type. We allow for activity types to define either a pre-set activity duration (constant or random), or an end event type such that any event of that type triggers the completion of the activity.

A pre-set random duration is specified with the help of a probability distribution and corresponding parameters. It will be used on the creation of a new activity instance for scheduling an *ActivityEndEvent*. An *ActivityType* may specify in the form of opaque expressions (typically Java expressions) which resources are allocated to an activity instance. These expressions will normally use the *startEventVariable* for referring to objects from the context of the activity start event.

## 3. Modeling a Service queue system with Activities

In this section we show how to model and simulate the service queue system with the help of the *ActivityType* element introduced in the previous section. We use BPMN for expressing the process model for our simulation scenario.

Customers arrive at random times at a service desk where they have to wait in a queue when the service desk is busy. The time between two customer arrivals is uniformly distributed between 1 and 8 minutes. The time for completing a service is, for simplicity, also uniformly distributed between 1 and 6 minutes.

An arriving customer is represented by a newly generated object, which is destroyed again, when this customer leaves the system. The customer in service is represented by the first item in the First-In-First-Out (FIFO) queue, while the remaining items of the queue represent the waiting line.

The information model for this scenario includes one global Boolean variable (*serviceDeskBusy*), one object type (Customer with one attribute *arrivalTime*), one

exogenous event type (CustomerArrival) and one activity type PerformService, which is defined in the following way:

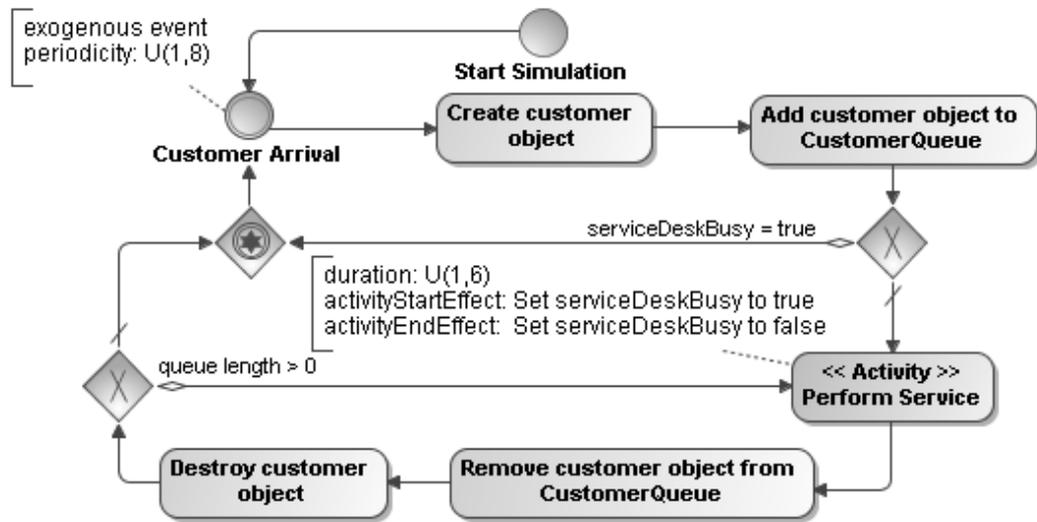


Figure 4: Modeling a Service queue with Activities

```

<ActivityType name="PerformService">
  <Duration probabilityDistribution="Uniform">
    <LowerBound value="1"/>
    <UpperBound value="6"/>
  </Duration>
  <ActivityStartEffect>
    <UpdateGlobalVariable name="serviceDeskBusy" value="true"/>
  </ActivityStartEffect>
  <ActivityEndEffect>
    <UpdateGlobalVariable name="serviceDeskBusy" value="false"/>
  </ActivityEndEffect>
</ActivityType>

```

In addition, we also define a FIFO queue (CustomerQueue). The process model is defined by the BPMN diagram shown in Figure 4. For simplicity, we discarded the code needed for defining the usual statistics computations in this example.

The process starts with a CustomerArrival event. In ER/AOR simulation, each event triggers a rules that handles it (so, rules are ‘event handlers’). The CustomerArrival event triggers the following rule (expressed in the XML-based ER simulation language):

```

<EnvironmentRule name="CustomerArrivalRule">
  <WHEN eventType="CustomerArrival" eventVariable="e"/>
  <UPDATE-ENV>
    <Create>
      <Object type="Customer" addToCollection="CustomerQueue">
        <Slot property="arrivalTime">
          <ValueExpr language="Java">e.getOccurrenceTime()</ValueExpr>
        </Slot>
      </Object>
    </Create>
  </UPDATE-ENV>
</EnvironmentRule>

```

```

    </Slot>
  </Object>
</Create>
</UPDATE-ENV>
<IF language="Java"> ! Global.isServiceDeskBusy() </IF>
<SCHEDULE-EVT>
  <ActivityStartEventExpr activityType="PerformService"/>
</SCHEDULE-EVT>
</EnvironmentRule>

```

Finally, the EndService event resulting from the StartServiceRule triggers the following EndServiceRule:

```

<EnvironmentRule name="EndServiceRule">
  <WHEN eventType="ActivityEndEvent" activityType="PerformService"/>
  <UPDATE-ENV>
    <RemoveObjectFromCollection collectionName="CustomerQueue"
      itemObjectVariable="o"/>
    <DestroyObject objectType="Customer" objectVariable="o"/>
  </UPDATE-ENV>
  <FOR objectType="Collection" objectVariable="q"
    objectName="CustomerQueue"/>
  <IF language="Java"> q.size() > 1 </IF>
  <SCHEDULE-EVT>
    <ActivityStartEventExpr activityType="PerformService"/>
  </SCHEDULE-EVT>
</EnvironmentRule>

```

For the complete simulation model, please check out: [http://oxygen.informatik.tu-cottbus.de/aors/examples/Management/ServiceQueue\\_withActivities/scenario.xml](http://oxygen.informatik.tu-cottbus.de/aors/examples/Management/ServiceQueue_withActivities/scenario.xml).

## 4. Conclusions

We have presented an ongoing work that extends the ER/AOR simulation language by adding an activity construct. We have also shown that our approach is closely related with BPMN, but also with the activity concept that is envisioned in DES related literature.

## References

- [1] ER/AOR Simulation Framework: <http://www.AOR-Simulation.org>
- [2] *Greasley, A.*: Book: Simulation Modeling for Business. Ashgate Publisher, ISBN: 0-7546-3214-8, (2000).
- [3] *Ingalls, R.G.*: Introduction to Simulation. In Mason, S.J. Hill, R.R. Moench, L. Rose, O. Jefferson, T. Fowler, J.W. (Eds.), Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, (2008), 17–26.
- [4] *Wagner, G.*: AOR Modeling and Simulation – Towards a General Architecture for Agent-Based Discrete Event Simulation. In Agent-Oriented Information Systems, Lecture Notes in AI, (2004), volume 3030, 174–188. Springer-Verlag.

# **Zusammenhänge erkennen, visualisieren, modellieren**

Ulrich Spahn  
spahn@me-netzwerk.de  
Modeler Forum Berlin-Brandenburg  
c/o ME-Netzwerk der Metall- und Elektroindustrie in der Hauptstadtregion  
Am Schillertheater 2, 10625 Berlin  
Tel. 030/31 00 5 -200

## **Kurzfassung**

Mit dem CONSIDEO MODELER steht eine Software zur Verfügung, die hinsichtlich ihrer intuitiven Bedienung als auch mit der verfügbaren Funktionalität die Modellierung komplexer Ursache-Wirkungszusammenhänge in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft allen interessierten Anwendern ermöglicht – ohne wissenschaftlich-technische Vorbildung. Jeder der Mindmapping anwendet, Excel benutzen kann und etwas zu planen oder organisieren hat, gehört zur Zielgruppe des CONSIDEO MODELER.

Die Einsatzbeispiele der verschiedensten Referenzkunden (u.a. BASF, BMW, Deutsche Bahn, iABG) zeigen das breite Einsatzspektrum des CONSIDEO MODELER. Diverse Schulen und Universitäten haben den CONSIDEO MODELER bereits im Einsatz. Bayern wird beispielsweise den CONSIDEO MODELER zentral an allen Gymnasien im Fach Wirtschaftsinformatik einführen. Die Software ist für Schulen, Universitäten kostenlos.

Es soll weltweit selbstverständlich werden, dass Menschen Zusammenhänge „modellieren“ [2] – damit transparent und analysierbar machen – und somit zu besseren Planungen und Entscheidungen zu kommen. Eine kritische Masse von Entscheidern muss die Vorreiterrolle übernehmen und den Paradigmenwechsel einleiten.

## **1 Endlich praxisnah einsetzbar: Vernetztes Denken**

Vernetztes Denken ist die wichtigste Schlüsselkompetenz der Zukunft. So wird in einer Umfrage [1] der Boston Consulting Group strategisch-vernetztes Denken und Leistungswille/ Ergebnisorientierung als die am häufigsten verlangten Fähigkeiten von Mitarbeitern genannt. In der Umfrage wurde nach künftigen Anforderungen der Managementqualifikation in Unternehmen gefragt.

Vernetztes Denken heißt Ursachen und Wirkungen von Einflussfaktoren einer Aufgabe oder einer Situation zu betrachten. Die wirkenden Faktoren hängen über mehrere Ebenen voneinander ab – sind in ihrer zeitlichen Wirkung und Einflusstärke miteinander verkoppelt. Die wirkenden Zusammenhänge zu begreifen ermöglicht erfolgreiches Handeln. Fehler sind umgekehrt in der Regel auf Nichterkennen von Zusammenhängen oder deren falsche Einschätzung zurückzuführen.



Der Screen-Shot (Bild 1) zeigt ein beispielhaftes Unternehmensmodell, wie es mit dem CONSIDEO MODELER erstellt und über verschiedenste Ebenen hinweg dynamisch analysiert werden kann.

Die vom Anwender als relevant eingeordneten Faktoren für die jeweilige Aufgabenstellung werden per Maus verbunden. Polarität der Wirkrichtung sowie Stärke und Zeitverzögerung können kontextbezogen frei definiert werden. Die resultierenden Wirkungszusammenhänge werden über die Einfluß-Matrix für jeden Faktor dargestellt. Die Wirkung von verstärkenden und ausgleichenden Schleifen ist sofort ersichtlich. Die Idee des „Vester’schen Papiercomputer“ wird in idealer Weise umgesetzt und für den Anwender zur echten Arbeitshilfe.

Im nächsten Schritt kann das qualitative Modell in ein voll simulierbares, qualitatives Modell überführt werden. Dazu werden die Faktoren zu Bestands- und Flussgrößen und die Beziehungen zwischen den Faktoren des Modells werden mit Hilfe mathematischer bzw. logischer Funktionen beschrieben. Neben einem Formel-Editor stehen dem Anwender grafische Werkzeuge zur Verfügung, um das erwartete bzw. gewünschte Verhalten vorzugeben. Notwendige Werteliste (z.B. Umsätze) können direkt oder per Datenimport bzw. SQL-Abfrage eingegeben werden. Das System hilft dem Anwender bei der Modell-Validierung, in dem es auf fehlerhafte oder unvollständige Angaben in Formeln oder fehlende Faktordefinitionen hinweist. Die Simulation erfolgt dann, in der in der Beschreibungsebene formulierten Zeitdefinition. Ergebnisse der Simulation werden über Cockpitfunktionen und Analyse-Charts dem Anwender präsentiert. Der Anwender kann bestimmte Zustände oder Vorgaben einfrieren und über Änderung von Variablen das Systemverhalten in Szenarien untersuchen.

## 2 Wurzeln im System Dynamics

Für Experten der Simulationstechnik greift der CONSIDEO-MODELER mit System Dynamics auf bewährte Methodik zurück. In der Software wurden „Simple Euler“ und die beiden Runge-Kutta-Verfahren implementiert. Dieses Verfahren nutzen auch andere System Dynamics-Anwendungen. Eine deutliche Verbesserung gegenüber dem „Vester-Ansatz“ [3] bietet die Möglichkeit, den Grad der gegenseitigen Beeinflussung der Faktoren prozentual anzugeben. So kann eine Unterscheidung der jeweiligen Einflüsse untereinander getroffen werden.

Nach dem „Stock-/ Non-Stock-Prinzip“ werden automatisch die richtigen Faktortypen gebildet bzw. Quick-Fixes zum Erstellen simulierbarer Modelle dem Anwender zugänglich gemacht. So ist es möglich quantitative Modelle auch ohne System Dynamics Hintergrundkenntnisse zu erstellen, bei denen eine Simulation der Ursache-Wirkungs-Beziehungen durchgeführt werden kann.

System Dynamics bietet dem Anwender die Möglichkeit, Faktoren ohne fachliche Berücksichtigung von Klassen- und Objektstrukturen miteinander in Beziehung zu setzen. So können Faktoren miteinander in Verbindung gebracht werden, von denen man meint, dass diese miteinander in Beziehung stehen müssen z.B. „Verkäufe“ und „Wettbewerbs-situation“ oder „Verfügbares Einkommen“ und „Wirtschaftslage“. Erst in der konkreten Fortentwicklung des Modells werden dann vom Anwender die mathematisch korrekten Beschreibungen der wirkenden Faktorbeziehungen abverlangt.

Grundsätzlich soll der CONSIDEO-MODELER dem Anwender helfen, zunächst ein „mentales“ Modell der jeweiligen Aufgabenstellung zu entwickeln. Hier werden Kreativität, Abstraktionsvermögen und logisches Denken von den Anwendern verlangt. Die Beherrschung des Systems zur Beschreibung und Simulation des Modells tritt dabei eher in den Hintergrund bzw. wird auf die Beherrschung einer Office-Anwendung wie Microsoft EXCEL reduziert. So wie es dem Ziel des Entwickler-Teams des CONSIDEO-MODELERS entspricht, die Einstiegshürde bei den Nicht-Fachanwendern in das Thema „Modellierung“ und „Simulation“ deutlich abzusenken. An dieser Stelle gibt es die zentrale gemeinsame Schnittstelle mit den anderen Anbietern von (Experten-)Systemen der Simulationstechnik: Steigerung der Akzeptanz der Simulation.

Dieser Prozess wird z.B. softwareseitig dadurch unterstützt, dass Mind Maps in den CONSIDEO-MODELER importiert oder Wertebereiche das „Faktorverhalten“ allein durch „Zeichnen mit der Maus“ vorgegeben werden können.

Es können beliebig große Modelle durch Subsystem-Strukturen erstellt werden. Es sind bereits Modelle mit mehr als einhundert Faktoren in der Praxis im Einsatz z.B. bei der Deutschen Bahn oder dem Landkreis Bad Segeberg.

Dabei gilt es eine weitere Besonderheit des CONSIDEO-MODELER zu berücksichtigen. In der neuesten Version besteht die Möglichkeit, die Wirkung von Schleifen und Verzögerungen zu berücksichtigen bzw. ein Stück weit zu berechnen. Für den praktischen Einsatz ergibt so ein Weg, qualitativ eine Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen, um in einem zweiten Schritt die entscheidenden, „aktiven“ Faktoren quantitativ genauer zu betrachten. Die meisten Projekte reduzieren aus berechtigter Scheu vor zu großen und komplexen Modellen die Faktoren im Vorhinein. Damit besteht aber für die Anwender die Gefahr die bestimmenden Faktoren in einem System auszuklammern bzw. nicht zu berücksichtigen. Die Betrachtung „Qualitativ vor Quantitativ“ ist auch im Bereich Six-Sigma gängige Praxis.

Als Java-Programm ist der CONSIDEO MODELER betriebssystemübergreifend verfügbar. Es gibt neben der Basisversion zwei weitere Produkte. Der CONSIDEO OLAP MODELER kann mit Data Warehouse-Systemen z.B. SAP BW gekoppelt werden, um Daten für die Simulation verfügbar zu haben. Der CONSIDEO PROCESS MODELER steht zur Optimierung paralleler Prozesse zur Verfügung. Durch vorkonfigurierte Faktoren (z.B. Prozess, Ressource) können die Elemente der kritischen Kette und mögliche Flaschenhalse (Constraints) identifiziert werden.

### **3 Systemverhalten erkennen und steuern**

Eine zentrale Aufgabe im Unternehmen, Politik und Gesellschaft ist es spezifische Verhaltensmuster von Systemen und Strukturen zu erkennen. Das Wissen über das Systemverhalten ist ein entscheidender Hebel für die Erreichbarkeit der jeweiligen Zielsetzungen. Mit dem CONSIDEO-MODELER steht dem Anwender ein Werkzeug zur Verfügung die Wirkung von Schleifen und deren zeitliches Verhalten zu analysieren und besser zu verstehen. Grundsätzlich wirken in Systemen ausgleichende und verstärkende Schleifen. Die strukturbestimmende Wirkung von Schleifen wird in der Betrachtung kausaler Zusammenhänge oftmals vernachlässigt. Das menschliche Denken ist in der Lage maximal 4..5 Faktoren und deren Beziehungen untereinander zu überschauen. Oftmals

werden Analysen und Systembetrachtungen noch durch den jeweiligen Kontext der Situation bestimmt [4].

Mit dem CONSIDEO-MODELER ist nunmehr ein einfaches Werkzeug verfügbar mit dem der Anwender gezielt Schleifen analysieren kann. So werden endlich auch die von Peter Senge [5] beschriebenen Systemarchetypen des Verhaltens greifbar gemacht:

1. Gleichgewichtsprozess mit Verzögerung
2. Grenzen des Wachstums
3. Problemverschiebung
4. Verschiebung des Problems auf den Intervenierenden (Sonderfall)
5. Erodierende Ziele
6. Eskalation
7. Erfolg den Erfolgreichen
8. Tragödie der Gemeingüter
9. Fehlkorrekturen
10. Wachstum und Unterinvestition

Die Auseinandersetzung mit den verschiedenen Szenarien und Archetypen kommt in der täglichen Arbeit in Unternehmen vielfach zu kurz. Erst die Modellierung des Systems und der Analyse der Wirkung der bestimmenden Faktoren lassen die verschiedenen Handlungsmuster erkennen. Aktuelle Themen aus Politik und Wirtschaft können für die Beteiligten transparent und letztendlich plan- und steuerbar gemacht werden: Klimaerwärmung, Demografische Entwicklung, Umsatzprognose etc. In diesem Zusammenhang muss auch darauf hingewiesen werden, dass nicht alle Faktoren von den Anwendern oder Entscheidern direkt selbst beeinflusst werden können. In Systemen gibt es „Nichtlenkbare Größen“ wie z.B. Konsum oder Marktsättigung. Diese nichtlenkbaren Größen sind über entsprechende Vor- und Rückkopplungen mit den lenkbaren Größen (z.B. Lagerbestand, Produktion, Innovation) und den jeweiligen unternehmerischen Entscheidungen verbunden. Indikatoren (z.B. Verkaufszahlen) repräsentieren als Kennzahlen das Systemverhalten.

In dieser Betrachtung ist der CONSIDEO-MODELER ein wertvoller neuer Baustein im Rahmen eines ganzheitlichen Problemlösungs- bzw. Entscheidungsfindungsprozesses.

## **4 Modeler Forum Berlin-Brandenburg**

Das Modeler Forum Berlin-Brandenburg [[www.modeler-forum-bb.de](http://www.modeler-forum-bb.de)] versteht sich als Plattform für Informations- und Erfahrungsaustausch für interessierte und Anwender des CONSIDEO MODELER. Das Forum will mit seiner Arbeit die Anwendungen der Methoden und Werkzeuge des Vernetzten Denkens in Wirtschaft, Politik, Forschung und Lehre sowie im privaten Bereich aktiv fördern.

Das Modeler-Forum Berlin-Brandenburg wird unterstützt durch das ME-Netzwerk der Metall- und Elektroindustrie in der Hauptstadtregion. Seit 2008 organisiert das Netzwerk den „Tag der Entscheidung“ [[www.tag-der-entscheidung.de](http://www.tag-der-entscheidung.de)] als branchenübergreifendes Fachsymposium für Entscheidungsfindung in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.

## **5 Literatur**

- [1] *Boston Consulting Group*: Studie „Die Zukunft bilden“, 2007.
- [2] *Kai Neumann*: „Modelst Du schon – oder tappst Du noch im Dunkeln?“, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2007.
- [3] *Gomez, Gilbert, Probst*: „Vernetztes Denken im Management“, „Die Orientierung“, Nr. 89, Schweizerische Volksbank, Bern, 1987.
- [4] *Malcom Gladwell*: „Tipping Point“, Goldmann Verlag, 2002.
- [5] *Peter M. Senge*: „Die fünfte Disziplin“, Klett-Cotta, 10. Auflage, 2006.

# Neue Lösungsansätze zur Schweißverzugsberechnung

Christoph Stapelfeld, Nikolay Doynov, Vesselin Michailov  
Christoph.Stapelfeld@tu-cottbus.de  
BTU Cottbus, Lehrstuhl Fügetechnik  
Konrad-Wachsmann-Allee 17, 03046, Cottbus

## Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein kurzer Überblick zu den Meilensteinen der Entwicklung der Vorgehensweisen und Methoden zur Schweißverzugsberechnung gegeben. Angefangen wird bei den semi- oder rein empirischen und analytischen Modellen, welche Mitte des letzten Jahrhunderts entwickelt worden sind. Mit der stetig gestiegenen Rechenleistung wurden diese jedoch zunehmend von der numerischen Schweißsimulation abgelöst. Die Vorgehensweise und die Voraussetzungen einer transienten thermomechanischen Simulation werden erläutert. Aufgrund der enormen Komplexität der transienten Schweißsimulation stößt diese aber, speziell in der Anwendung auf komplexe Strukturen, bei der verfügbaren Rechentechnik an ihre Grenzen, so dass sich ein Trend hin zu vereinfachten oder gekoppelt analytisch-numerischen Hybridverfahren abzeichnet. Hinsichtlich der Genauigkeit und des Zeitaufwands werden einige der heutzutage verfügbaren Methoden verglichen.

## 1 Einleitung

Der Verzug einer Schweißkonstruktion nach dem lokalen Wärmeeintrag stellt nach wie vor eines der Hauptprobleme der Schweißtechnik dar (Bild 1). Durch Prognosen oder Ermittlung der bleibenden Verformungen können diese, beispielsweise durch geeignete Einspannbedingungen, Variation der Schweißfolge oder Nachbehandlungen minimiert werden. Somit lässt sich die Qualität der Schweißkonstruktion erhöhen und die Herstellungskosten senken. Demzufolge wird seit der Etablierung des Schweißens in der industriellen Fertigung auch an Methoden und mathematischen Modellen gearbeitet, um den Schweißverzug zu berechnen.



**Bild 1:** Verzug einer komplexen Schweißverbindung [1].

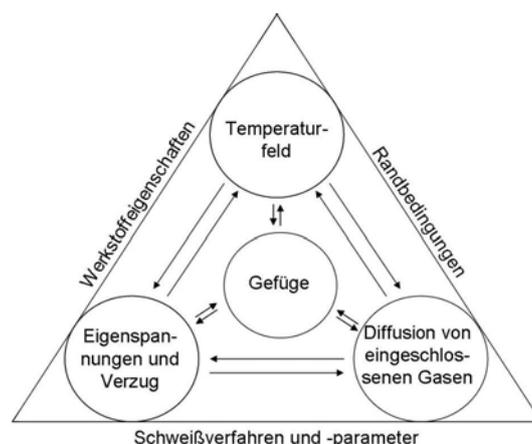
## 2 Methoden zur Schweißverzugsberechnung

Ein gebräuchlicher Ansatz, einen Sachverhalt mathematisch zu beschreiben, ist der empirische. Dessen bediente sich Malisius [2] und leitete aus einer Vielzahl von Experimenten Formeln ab, die die Verzüge von T- und I-Stoßverbindungen beschreiben. Die Gültigkeit der Vorschriften geht jedoch nicht über den untersuchten Bereich hinaus.

Grundlage des Erfolgs, eine Theorie zur Schweißverzugsberechnung zu formulieren, war die exakte mathematische Berechnung des sich beim Schweißen ausbildenden Temperaturfeldes nach dem Wärmeleitmodell von Rykalin und Rosenthal [3]. Darauf aufbauend begründeten u. a. Okerblom [4-6], Nikolaev [7, 8] und Gatovski [9] das analytische Schrumpfkraftmodell. Zentraler Bestandteil ist die Ermittlung der Größe und Form der Zone, die sich aufgrund der behinderten Wärmeausdehnung beim Schweißen plastisch verformt. Die Einflussfaktoren Schweißprozess und -parameter, Werkstoffkennwerte und die geometrischen Abmessungen der Schweißverbindung sowie Einspannungen und unterbrochene Nähte werden durch analytische oder semiempirische Korrekturfunktionen berücksichtigt. Jedoch sind auch diese Modelle nur auf einfache Geometrien anwendbar. Die Lösungen sind, aufgrund der nur begrenzt erfassten Einflüsse, in der Vorhersage des Schweißverzugs eingeschränkt.

1966 bis 1971 veröffentlichte Machnenko eine Reihe von Untersuchungsergebnissen, die im 1976 erschienen Buch [10] die ersten theoretischen Grundlagen der thermomechanischen Berechnung von Temperaturfeld, Schweißbeigenspannungen und Schweißverzug mit der Finite-Differenzen-Methode bildeten. Gleichzeitig arbeitete Friedman [11] an der Lösung einer thermomechanischen Analyse mittels der FE-Methode. 1978 verwendete Ueda [12] die Finite-Elemente-Methode, um die beim Schweißen entstehenden Zwängungsspannungen in einer unendlichen Platte auf die einer endlichen zu übertragen.

Die Bedeutung der numerischen Simulation nahm, parallel zur Etablierung der Computertechnik in Forschung und Industrie, auch in der Schweißtechnik zu. Der Schweißprozess kann schematisch als miteinander gekoppelte Einzelprozesse betrachtet werden (Bild 2), die je nach Zielstellung der Simulationsaufgabe auch in der numerischen Berechnung zu berücksichtigen sind.



**Bild 2:** Gekoppelte Teilprozesse eines Schweißprozesses [nach 13].

Das generelle Vorgehen bei der thermomechanischen Simulation ist in zwei Schritte gegliedert. Zuerst wird das sich zeitlich verändernde Temperaturfeld und den daraus resultierenden Temperaturzyklen für jeden Punkt der Schweißkonstruktion berechnet. Die entstehenden Aufheizgeschwindigkeiten, Maximaltemperaturen und Abkühlgeschwindigkeiten haben einen sehr großen Einfluss auf die Gefügeverteilung und auf die dazugehörigen mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung. Anschließend folgt eine elasto-plastische Berechnung. Grundlage hierbei ist, dass die behinderten Wärmedehnungen und -spannungen in elastische und plastische Dehnungen bzw. vorübergehende oder bleibende Eigenspannungen resultieren. Nachdem auch dieser Rechenschritt ausgeführt wurde, können sehr exakte Aussagen, zusätzlich zu Temperatur- und Gefügeverteilung, zur Spannungs- und Dehnungsverteilung bzw. zum Verzug der Schweißverbindung getroffen werden (Bild 3).



**Bild 3:** Temperaturfeld (links), Martensitverteilung (mitte) und Verzug (rechts).

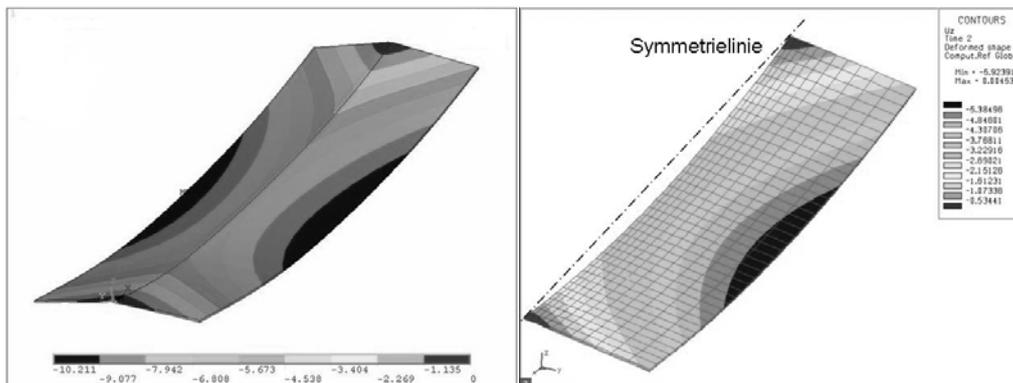
Quantitativ hochwertige Ergebnisse verlangen jedoch die genaue Kenntnis über die verschiedenen Wärmequellen-, Gefüge- und Werkstoffmodelle sowie über eine Vielzahl von Werkstoffkennwerten als Funktion der Temperatur. Des Weiteren sind die richtige Raum- und Zeitdiskretisierung sowie Kalibrierung der Wärmequelle und des Gesamtmodells notwendig. Die Genauigkeit, aber auch die Komplexität, lassen sich mit Prozessmodellen, die den Strömungsvorgang im Schmelzbad berücksichtigen zusätzlich steigern [14]. Dies führt zu einem enorm hohen Rechen- und Modellierungsaufwand. Der Einsatz dieses Verfahrens zur Verzugsberechnung von komplexen Strukturen ist somit generell in Frage zu stellen.

### 3 Vereinfachte Lösungsansätze

Die Problematik, die numerische Schweißsimulation, aufgrund ihres hohen zeitlichen Aufwands und dem nötigen Erfahrungs- und Wissensschatz in der Industrie zu etablieren, erkannten auch die Hersteller kommerzieller Software. Eine Maßnahme stellt beispielsweise der so genannte Local-Global-Approach dar [15]. An lokalen Modellen werden bei diesem vereinfachten Verfahren die plastischen Verformungen bestimmt und anschließend auf das globale Modell des Bauteils übertragen. Die Ermittlung der Randbedingungen, unter denen die thermomechanische Simulation am lokalen Modell durchgeführt wird, bleibt jedoch bis heute unklar.

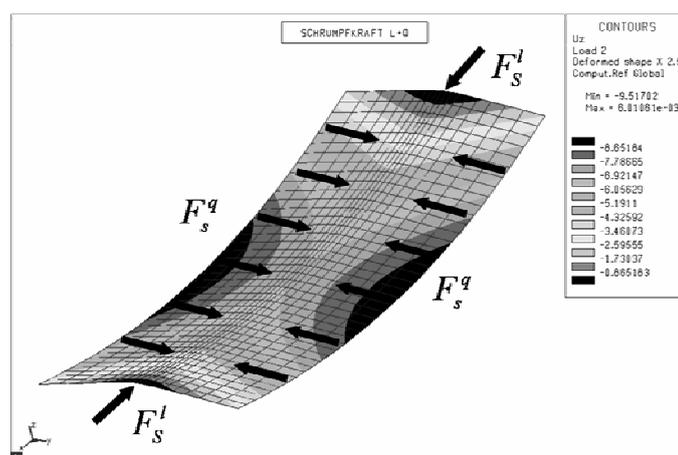
Der Bedarf an schnellen Lösungen ist so groß, dass auch Ersatzmodelle - fast ohne physikalischen Hintergrund - angeboten werden [16, 17].

In einem noch laufenden AiF-Forschungsvorhaben werden drei alternative Verzugsberechnungsverfahren untersucht. Unter Anderem das Maximaltemperaturmodell (MT-Modell). Bei diesem Ansatz wird mit einem analytischen oder numerischen Modell die Maximaltemperaturverteilung berechnet und anschließend auf das globale elasto-plastische Modell des Bauteils übertragen. Die nichtlineare numerische Verzugsberechnung erfolgt anschließend in zwei Schritten - Aufheizen und Abkühlen. Die mit dem MT-Modell erzielten Ergebnisse stimmen mit den realen Verformungen qualitativ überein (Bild 4), sind jedoch quantitativ zu gering (Tabelle 1).



**Bild 4:** Verformungsbild der Platte - L=300mm, B=100mm, S=1mm -ermittelt mit durchgehender thermomechanischer Simulation (links) und Maximaltemperaturmodell (rechts).

Ein weiterer Ansatz, das „Hybride Schrumpfkraftmodell“ (Hybrides SK-Modell), stellt eine gänzlich neue Herangehensweise an die Verzugsberechnung dar. In einem ersten Schritt werden die Längs- und Querschrumpfkraft und deren zugehörige Angriffspunkte nach den Algorithmen [3-8] ermittelt. Diese werden anschließend auf das FE-Modell des Bauteils aufgebracht (Bild 5) und die Verformungen mittels einer rein elastischen Analyse berechnet.



**Bild 5:** Aufbringen der nach der Schrumpfkrafttheorie ermittelten Kräfte und die daraus resultierende Durchbiegung der Platte.

Die mittels der beiden vereinfachten Lösungsansätze berechneten Verformungen sind in Tabelle 1 denen einer durchgehenden thermomechanischen Simulation und denen des Experiments gegenübergestellt. Die Ergebnisse des Maximaltemperaturmodells sind generell zu gering, stimmen jedoch qualitativ mit der Realität überein. Eine Sensibilitätsanalyse hinsichtlich der Komplexität des verwendeten Werkstoffmodells und der Vernetzung ergab zudem, dass das Maximaltemperaturmodell ein sehr stabiles Verfahren zur Schweißverzugsberechnung darstellt. Die Zeitersparnis im Vergleich zur durchgehenden thermomechanischen Simulation beträgt im betrachteten Fall ca. 90%. Somit ist das Maximaltemperaturmodell für Optimierungsaufgaben sehr gut geeignet.

Die mit dem Hybriden Schrumpfkraftmodell berechneten Schweißverformungen stimmen mit der Realität für ingenieurstechnische Anwendungen ausreichend überein. In Verbindung mit einem für die Berechnung der Schrumpfkraft und den dazugehörigen Angriffspunkten entwickelten Berechnungsprogramm „WELDIS“ (Weld Distortions) [18] birgt dieser vereinfachte Ansatz in Bezug auf Genauigkeit der Ergebnisse und Zeiteinsparung das größte Potential.

**Tabelle 1:** Gegenüberstellung der Ergebnisse der unterschiedlichen Herangehensweisen mit dem Experiment.

	<i>CPU-Zeit</i> [s]	<i>Längsverzug</i> [mm]	<i>Querverzug</i> [mm]	<i>Durchbiegung</i> [mm]
<i>Experiment</i>	-	-1,1	-0,25	-12,1
<i>Thermomechanisch</i>	21600	-1,1	-0,26	-10,2
<i>MT-Modell</i>	900	-0,4	-0,13	-5,9
<i>Hybrides SK-Modell</i>	2	-1,5	-0,22	-9,5

Das Vorhaben wurde unter der Nummer AiF 15276 BR vom BMWi über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert.

## 4 Literatur

- [1] *Klæstrup, J.*: Welding of structural steels. Online-Publikation, [http://www.industrial-lasers.com/display\\_article/278188/39/ARCHI/none/Feat/Welding-of-structural-steels](http://www.industrial-lasers.com/display_article/278188/39/ARCHI/none/Feat/Welding-of-structural-steels), Stand: 2006.
- [2] *Malisius, R.*: Schrumpfungen, Spannungen und Risse beim Schweißen. Düsseldorf, DVS-Verlag, 1957.
- [3] *Radaj, D.*: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen. Düsseldorf, DVS-Verlag, 2002.
- [4] *Okerblom, N. O.*: Svarochnie deformazii i naprjajenija. Moskau, Maschgiz, 1948.
- [5] *Okerblom, N. O.*: Rastschet deformazii metallokonstrukzii pri svarke. Moskau, Maschgiz, 1955.

- [6] *Okerblom, N. O.*: Konstruktivno-technologiceskoje projektirovanije svarnych konstrukzii. Moskau/Leningrad, Masinostroenie, 1964.
- [7] *Nikolaev, G. A.*: Svarnie konstrukzii. Moskau, Maschgiz, 1953.
- [8] *Nikolaev, G. A.*: Svarochnie konstrukzii. Moskau, Maschgiz, 1982.
- [9] *Gatovski, K. N., Karkhin, V. A.*: Theoria svarochnih deformazii i naprechenii. Leningrad, LKI, 1980.
- [10] *Machnenko, V. I.*: Raschotnie methodie issledovania kinetiki svarochniech napriajenii i deformatii. Kiew, Naukova dumka, 1976.
- [11] *Friedman, E.*: Thermomechanical analysis of the welding process using the finite element method. Trans ASME J. Pressure Vessel Techn. 97 (3) (1975), S. 206-213.
- [12] *Ueda, Y., Fukuda, K., Kim, Y. C.*: Restraint Stresses and Strains due to Slit Weld in Rectangular Plate. Transaction of JWRI 7 (1) (1978), S. 11-16.
- [13] *Michailov, V., Stadtaus, M.*: Einige Probleme der FE-Simulation zur Wasserstoff- und Stickstoffverteilung beim Schweißen. Zeitschrift für Metallkunde 92 (3) (2001), S. 247-252.
- [14] *Doynov, N., Ossenbrink, R., Michailov, V.*: Verzugsvorhersage beim Laserstrahlschweißen durch Implementierung eines Prozessmodells. DVS-Berichte Band 240 (2006), S. 350-355.
- [15] *Duan, Y. G., Vincent, Y., Boitot, F., Leblond, J. B., Bergheau, J. M.*: Prediction of welding residual distortions of large structures using a local/global approach. Journal of Mechanical Science and Technologie 21 (2007), S. 1700-1706.
- [16] *Tikhomirov, D., Rietman, B., Kose, K., Makkink, M.*: Computing Welding Distortion: Comparison of Different Industrially Applicable Methods. Vortragsband 11 SHE-MET (2005), S. 195-202.
- [17] *Rietman, B., Kose, K., Tikhomirov, D.*: Mechanische Schweißersatzmodelle für gekoppelte Simulationen, Stuttgart, Carl Hanser Verlag, 2004.
- [18] *Stapelfeld, C., Kloshek, K., Doynov, N., Michailov, V.*: Analytisches Schrumpfkraftmodell und Berechnungsprogramm zur Bestimmung des schweißbedingten Verzugs. DVS-Berichte Band 250 (2008), S. 401-405.

# **Fab Logistics Modeling and Optimization with acp-IT's InFrame Synapse Simulation Library and XJtec's Anylogic: Thin Film Photovoltaics**

Laurentiu A. Maniu, Artur M. Kuczapski and Susan Spitzner  
info@acp-it.com  
acp-IT SRL  
Celebi Evlia. 16, RO-300226 Timisoara  
acp-IT AG  
Handwerkstr. 29, D-70565 Stuttgart

## **Abstract**

Due to the fast market growth, solar cell manufacturers are under an extreme cost reduction pressure, which they want to overcome using modern, continuously under enhancement manufacturing processes. New equipments and technologies are continuously being developed, optimized from the production costs point of view, but which must still reach a high level of functionality and quality. The high costs of equipments, the continuously growing complexity of the processes, as well as the increased automation degree of production facilities, require advanced planning and optimization techniques already from the factory conception phase.

InFrame Synapse Simulation Library represents a reliable solution to model, analyze and optimize new production line concepts. The library comes with multiple component packages which allow fast development of simulation models.

This paper presents our approach of building reliable factory simulation models using InFrame Synapse Simulation Library and the Anylogic Simulation Software by XJ Technologies Company, through examples in thin film PV manufacturing.

Using Anylogic's development interface, we managed to create a visual and intuitive factory modeling, analysis and optimization tool that is able to meet any user requirement.

## **1 Introduction**

Photovoltaics (or PV) is the branch of industry related to converting solar energy directly into electricity. Due to the growing demand for renewable energy, manufacturing of solar cells and photovoltaic systems continuously expanded in the recent years, increasing by an average of 48% each year since 2002, making it the world's fastest-growing energy technology.

Due to this fast market growth, solar cell manufacturers are under an extreme cost reduction pressure, which they want to overcome using modern, continuously under enhancement manufacturing processes. New alternatives to standard crystalline silicon

modules were developed, including casting wafers (instead of sawing), thin film (CdTe, CIGS, amorphous Si and microcrystalline Si), concentrator modules, and continuous printing processes. New equipments and technologies are continuously being developed, highly optimized from the production costs point of view, but which must still reach a high level of functionality and quality. The high costs of equipments, the continuously growing complexity of the processes, as well as the increased automation degree of production facilities, require advanced planning and optimization techniques already from the factory conception phase.

By means of advanced logistics simulations, engineers have a powerful instrument to find out the type and number of required equipments already from the future factory planning phase. For the designing and dimensioning of such new production facilities, detailed simulation models of the future fab are build already in the early planning phases, in order to evaluate different layout alternatives, from throughput and utilization perspectives.

Using these models, possible bottlenecks in the material flow can be inspected, a minimal buffering capacity can be identified or a maximum maintenance time window can be tested. Besides taking care of dynamic maintenance cycles of individual equipment, the simulation models also identify the fab behavior in case of breakdowns, scrap probability, as well as influence on performance due to setup downtimes caused by product change.

acp-IT is a trusted international partner, offering professional consulting and IT solutions for planning and operation of production lines. The simulation and optimization of manufacturing scenarios is one of the core competencies of our Logistics and Digital Factory Business Unit. The Fab simulation models built by acp-IT, using the Anylogic Simulation Software by XJ Technologies Company, were remarked in the industry due to ease of modeling and configuration, flexibility and excellent performance.

On top of Anylogic, acp-IT has built a set of libraries and methodologies, both for manufacturing facilities in general and special for PV industry, which are used in fab logistics simulation and optimization projects, in order to reduce the modeling time, increase user confidence in model accuracy, analyze simulation output and identify optimization possibilities.

Connected to the in-house developed InFrame Synapse MES, the simulation models created by acp-IT can be used to test factory control strategies and to reduce installation times, which lead to faster fab ramp-up times.

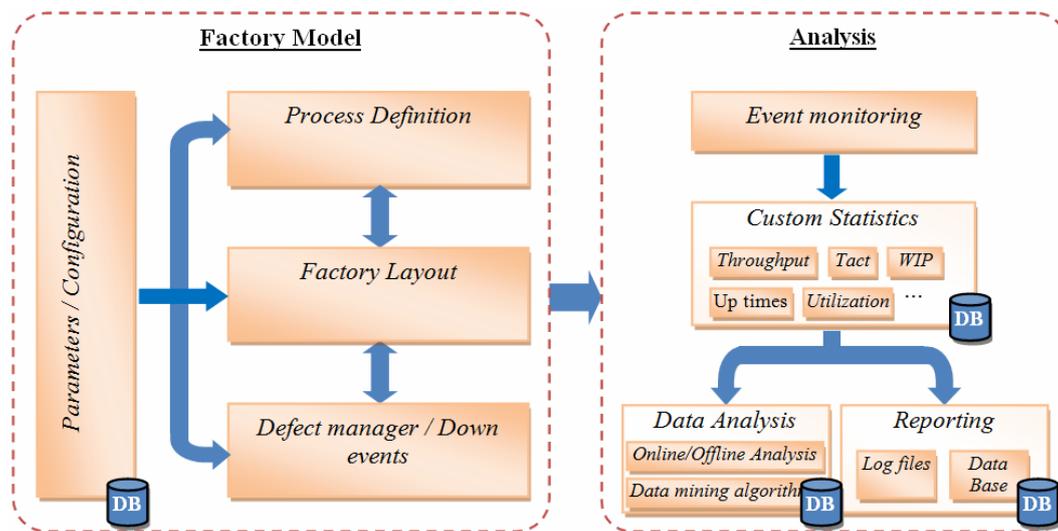
## **2 Fab Modeling Approach**

acp-IT offers complete services in modeling, simulation and analysis of production facilities already from the fab planning phase. Using the simulation models, one can identify problems in the fab concepts, figure out solutions, adapt the models, until an optimum layout is reached.

The simulation projects are developed using the visual simulation environment Anylogic, by XJ Technologies Company, allowing the user to gain a complete vision of the project structure. The end user has direct access to the custom developed model, thus he can edit and extend the model at customer's option.

The projects are developed on top of InFrame Synapse simulation library, which provides a standard simulation model development process, independent of the problem domain. The process allows an iterative model development. Starting from a simplified model, with simple equipments and linear processes, the model designer discovers and corrects errors or conceptual problems, till the model is growing to a complex and detailed fab.

The simulation models are structured as presented in Figure 1. The “Factory Model” component contains the model configuration, processes specifications, production facility layout and defects generator modules, while the “Analysis” component defines the way in which events and messages generated during simulation runs are processed. Within the “Analysis” component, the user has the option to visually define custom tables and graphs.



**Figure 1:** Simulation model architecture.

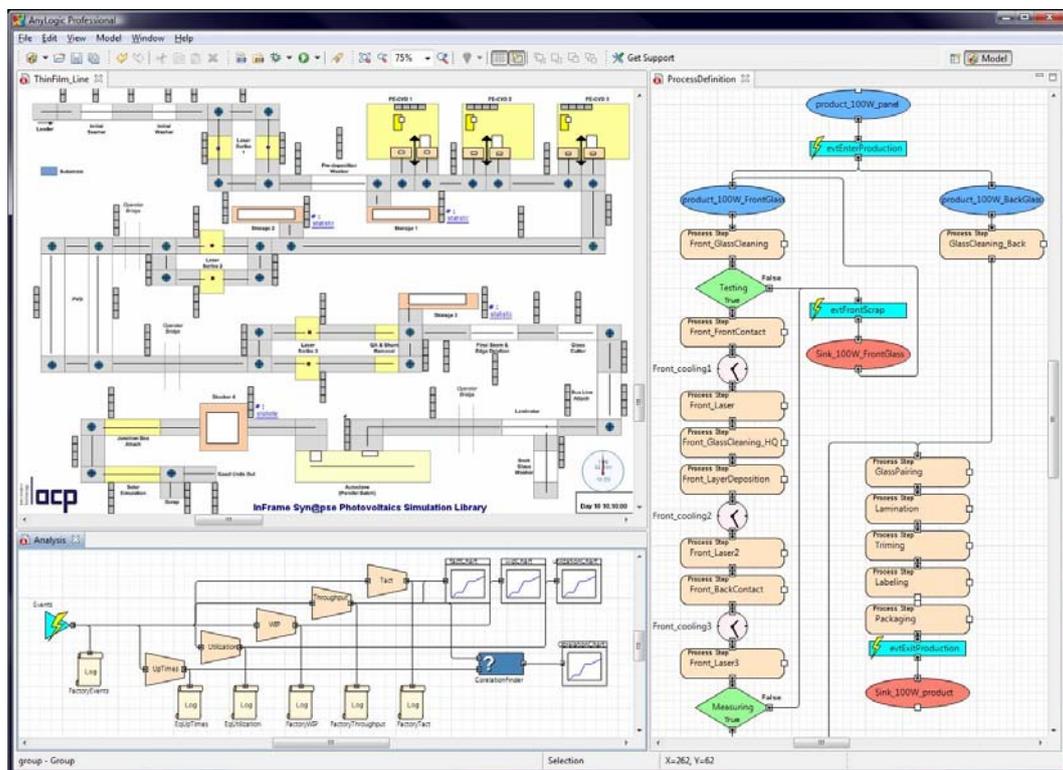
InFrame Synapse simulation library contains predefined components for:

- factory equipments,
- handling and automation equipments
- production processes,
- configuration structures,
- defects emulators,
- generation and collection of message and events,
- filtering and processing of message and events,
- data mining algorithms
- statistics,
- reports.

The components are developed in Java, using the Anylogic visual simulation environment, leading to an intuitive modeling environment.

In Figure 2 an example of a PV production line modeling and simulation project is presented. There are depicted the fab layout (upper-left), the production process (right), as well as the data analysis and report network (bottom-left).

In order to define the production process, the model designer uses a logical scheme. This way, the products are defined as a steps sequence or network, interconnected with decision elements for product routing. The components used to build the logical scheme are either standard InFrame Synapse simulation library elements or client specific custom developed components.



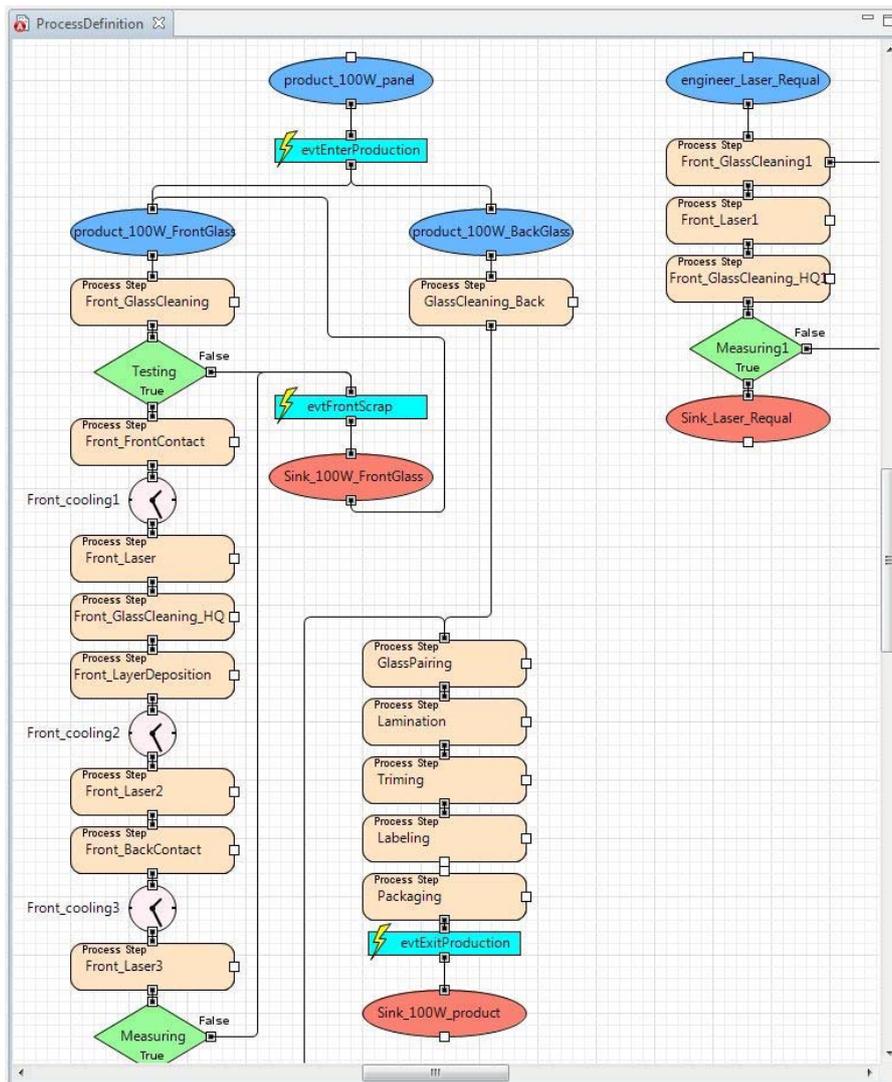
**Figure 2:** Factory Simulation Model in Anylogic.

The example in Figure 3 shows several such standard elements, like Product Start., Process Step, Conditional Routing, Waiting Step, Message Generator, Product Finish. In particular, there is exemplified that a product can be defined as an assembly of several sub-products, or that scrap can trigger a new product start. Beside regular products, there can be modeled engineering products, like experiments, measurement or requalification products or sequences.

In order to simulate the production processes defined before, the next step is to model the virtual fab, through which the production will run. The virtual fab is defined by 2 schemes: the logical and the visual one. The logical scheme defines the connections and

the transport networks between equipments, implementing the production flow and the dispatching logic. In order to successfully run production in the virtually modeled fab, it must be possible to execute the production processes defined before, otherwise errors will be thrown during simulation runs, showing which steps block the execution.

The visual scheme is used to generate animation during simulation run and is optional. Still, it is recommended to build it, as this allows visual production tracking, the model designer being able to identify possible leaks in the model logic, if any.



**Figure 3:** Process flow definition.

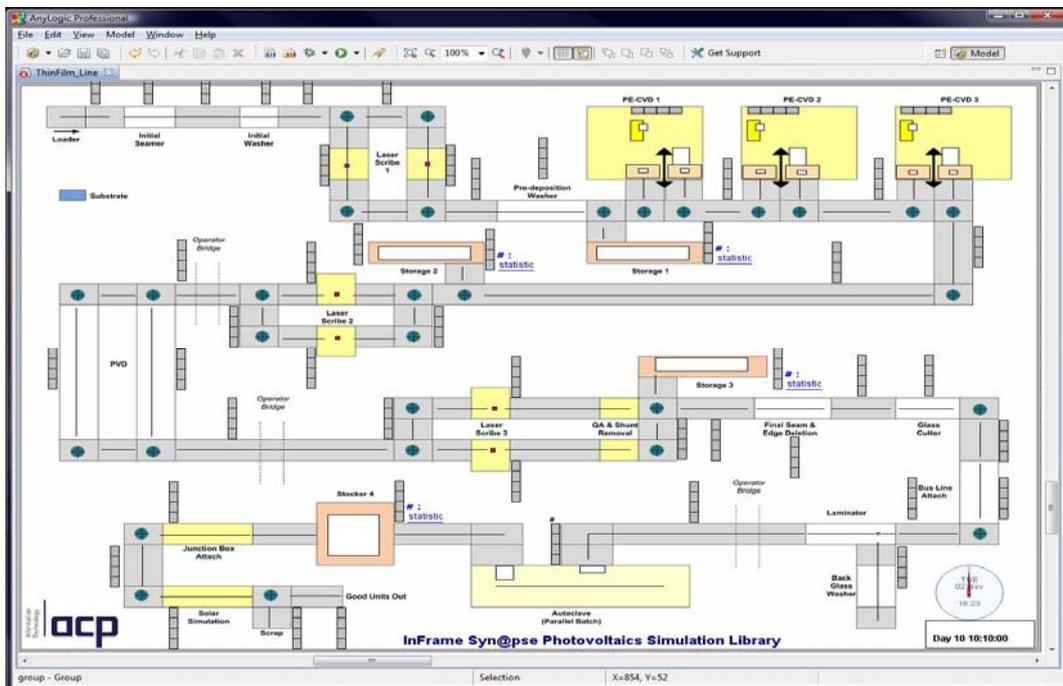


Figure 4: Factory floor layout.

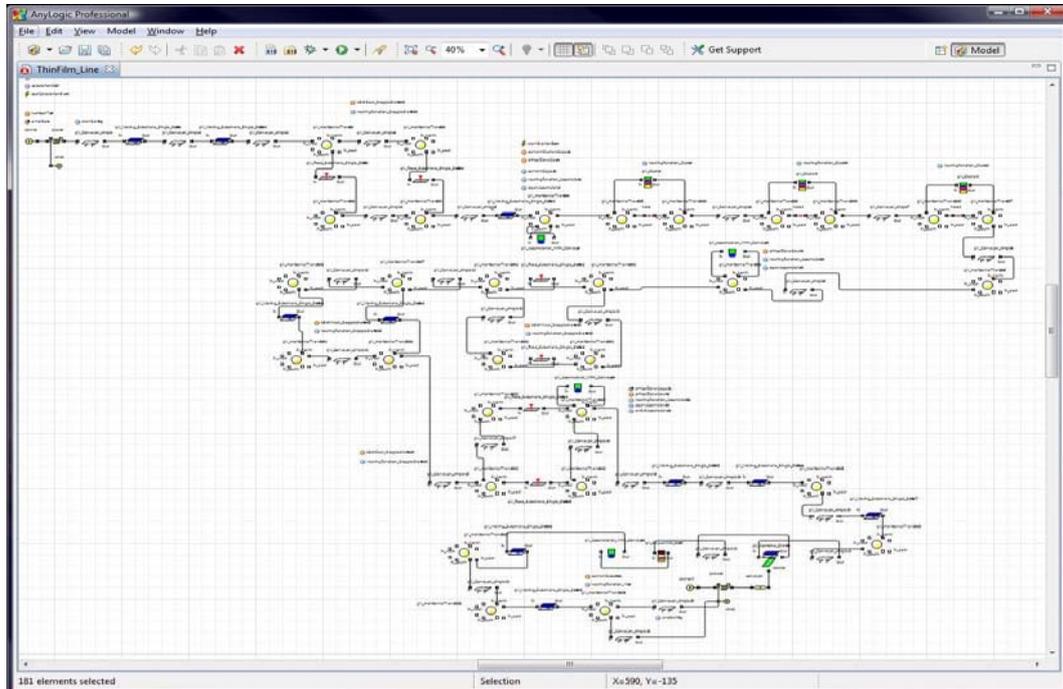
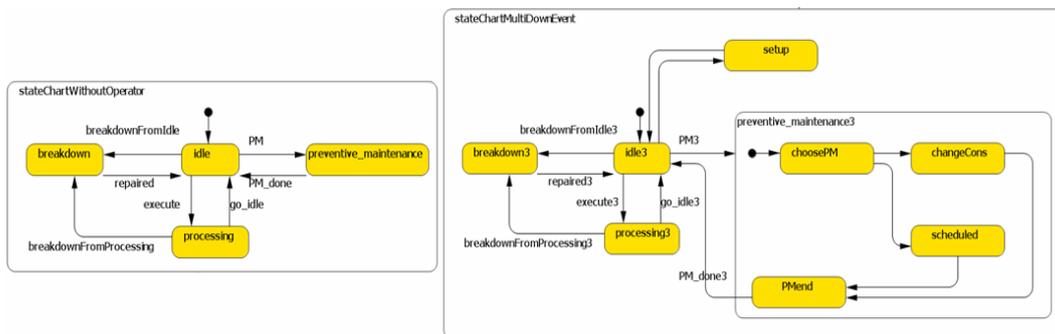
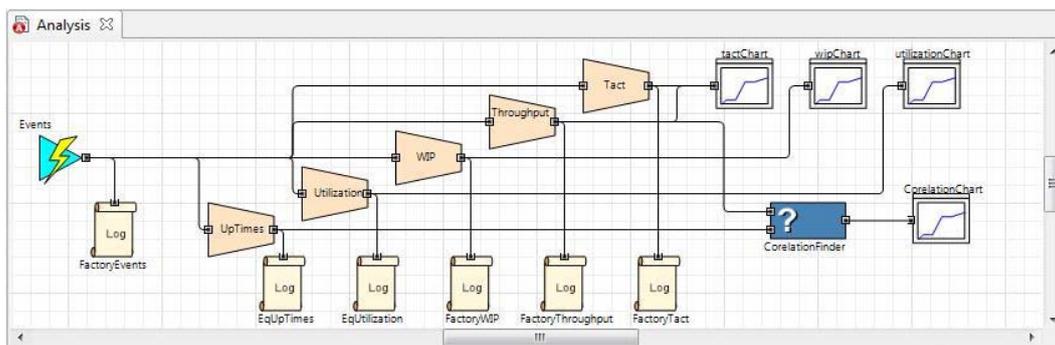


Figure 5: Factory floor schematics.



**Figure 6:** Equipment states modeling.

In order to track equipment states, custom state charts can be defined. Each equipment has at least four machine states to build up its behavior: idle, processing, breakdown and preventive maintenance. State transitions are monitored and reports and statistics can be generated.



**Figure 7:** Analysis schematics

Simulation-generated data analysis and reporting is modeled using an analysis scheme, using both standard InFrame Synapse Simulation library elements, as well as client specific custom developed components.

The collected data is pushed into filtering and translation components. These components can measure different parameters, like Line Tact, Throughput, WIP etc. The output can be written in into files or databases and/or can be processed to identify different correlations between production parameters and results, which lead to identification of problems in the production and optimization possibilities. Both raw filtered output, as well as correlation results, can be represented in graphs.

Data analysis is possible both in online mode, during simulation run, as well as after the simulation run, in offline mode. In offline mode, there can be analyzed data from several simulation runs.

### 3 Benefits

Already from the production line planning phase, analysis, evaluation and optimization of the layout concepts is a necessity, which ensures success of industrial development projects. Especially in the PV thinfilm industry, on which our modeling and simulation approach was exemplified, the time available to design a new efficient production line is very limited, due to cost reduction pressure and tight competition between manufacturers.

InFrame Synapse Simulation Library supports line designers to create logistical and production simulation models, used to analyze and optimize the new concepts. Using the library on top of the powerful Anylogic Simulation Environment represents a reliable and easy to use solution, with the following advantages:

- The development structure allow iterative model development, allowing detection and correction of conceptual errors already from the early phases
- The definition of both production processes as well as fab layout is done visually
- The designer can decide in which details he wants to model the processes
- The development process and project structure increases the designer confidence in the correctness of the modeled fab
- The standards components of the InFrame Synapse Simulation Library shorten the fab modeling and analysis time
- Simulation output data analysis methods are customizable and can fulfill any custom requirements.
- It is possible to involve complex data mining algorithm in the data analysis flow.
- The output can be by analyzed both online and offline
- Since the simulated model runs as a fully automated fab, the real fab automation is defined already from the early planning phase.

### 4 Conclusions

InFrame Synapse Simulation Library represents a reliable solution to analyze and optimize new production line concepts. In this paper we exemplified the usage in the PV thin film domain. The library comes with multiple component packages which allow fast development of simulation models in a visual attractive and intuitive form.

The development process and the project structure ensure quality and increase the designer confidence in the correctness of the modeled fab and obtained results, reducing the model design phase. The flexible and customizable analysis methods and components, as well as visual simulations increase the utility of the developed models, leading to early identification of conceptual problems. Production optimization can be done by finding and eliminate production bottlenecks. By identifying correlations between production metrics and configuration parameters, the costs to production ratio can be improved.

The equipments models can be simple mathematical models, as well as complex ones with real behavior, and the equipment states can be defined to highlight all functional details.

# Datenorientierte Modellbildung in der Simulation

Rainer Frick  
rainer.frick@v-research.at  
V-Research GmbH  
Stadtstr. 33, A-6850 Dornbirn

## Kurzfassung

Zur ereignisdiskreten Simulation von logistischen Prozessen steht mittlerweile eine große Auswahl von Software-Werkzeugen zur Verfügung - Flexsim, AnyLogic, Arena, um nur einige davon zu nennen [5-6]. Alle diese Werkzeuge stellen Bibliotheken und Funktionen zur Verfügung um einen konkreten Anwendungsfall zu modellieren, mit einer Auftragslast zu versehen und somit eine Simulationsstudie durchzuführen.

Bereits kleine Änderungen des Anwendungsfalles können einen erheblichen Aufwand zur Anpassung des bestehenden Simulationsmodells bedeuten. Datenorientierte Modellbildung bietet die Möglichkeit genannte Aufwendungen zu dezimieren und Simulationsmodelle langlebiger zu gestalten.

Dieser Artikel präsentiert unsere Erfahrungen in diesem Bereich.

## 1 Einleitung

Ereignisdiskrete Simulationen stellen eine immer wichtiger werdende Stütze in der Entscheidungsfindung zur Bewertung von logistischen Prozessen dar [4]. Gar ist schon von der digitalen Fabrik [6] und virtuellen Produktionssystemen die Rede. Die Idee, komplette Prozessmodelle vor ihrer tatsächlichen Implementierung rechnergestützt zu bewerten findet mittlerweile auch bei kleineren Unternehmen beachtlichen Anklang.

Allerdings ist das Erstellen und Durchführen einer Simulationsstudie zusätzlich zur kostenintensiven Datenerfassung mit beachtlichen Kosten behaftet. So ist nicht nur umfangreiches Simulations-Know-how erforderlich, sondern in den meisten Fällen auch Programmierkenntnisse zur Adaptierung spezieller Problemstellungen, die nicht mit den Standardbibliotheken des jeweils genutzten Software-Werkzeuges zu bewerkstelligen sind, aber so gut wie jeder Anwendungsfall mit sich bringt. Viele Anbieter von Simulations-Software haben mit der Implementierung von kundenindividuellen Simulationsbibliotheken bzw. dem Erstellen von kundenspezifischen Simulationsmodellen ihr Geschäftsmodell erweitert.

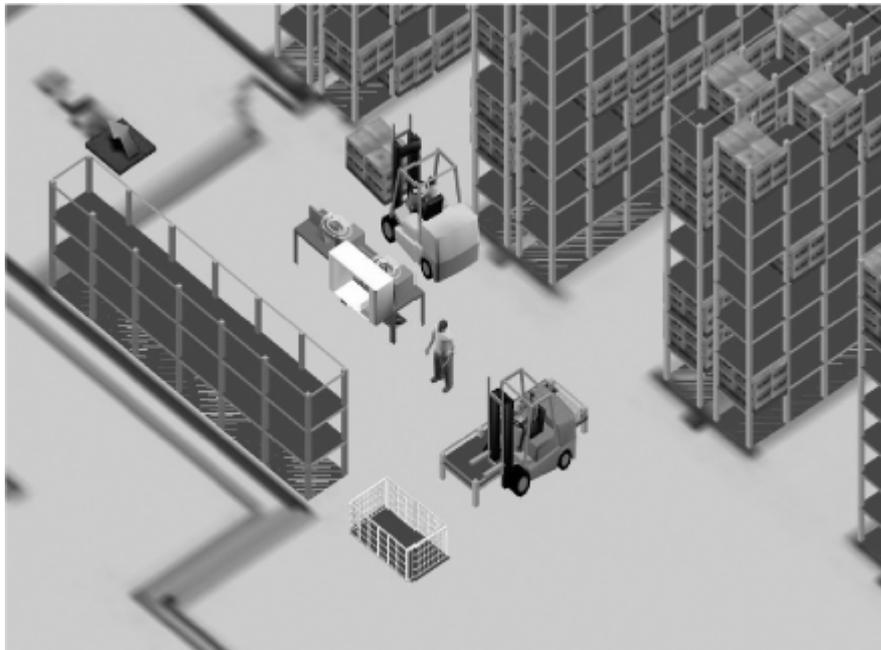
Des Weiteren ist es mit dem einmaligen Erstellen eines Simulationsmodells in den meisten Anwendungsfällen nicht getan, eine kontinuierliche Adaptierung an die reale Welt ist von Nöten und nur von einem Simulationsexperten auf Basis bestehender Modelle möglich.

Im Gegensatz zur oben beschriebenen modellorientierten Simulation bietet die datenorientierte Modellbildung / Modellierung oder auch automatische Modellgenerierung [6]

mehr Flexibilität im Umgang mit dem Anwendungsfall bzw. dem Durchführen von veränderten Simulationsszenarien.

## 2 Ansatz

Bei einer modellbasierten Erstellung einer Simulationsstudie ist das typische Vorgehen dieses, die Elemente der Simulation mittels eines graphischen und / oder eines Code Editors miteinander in Beziehung zu setzen. So werden z.B. bei einem Regalsystem die einzelnen Regale im Simulationsmodell platziert und von Zubringern bedient. Spätere Änderungen wie z.B. weitere Regale würden ein Eingreifen in das bestehende Modell bedeuten und die Betreuung durch den Simulationsexperten erfordern.



**Bild 1:** Ausschnitt eines modellierten Regallagers.

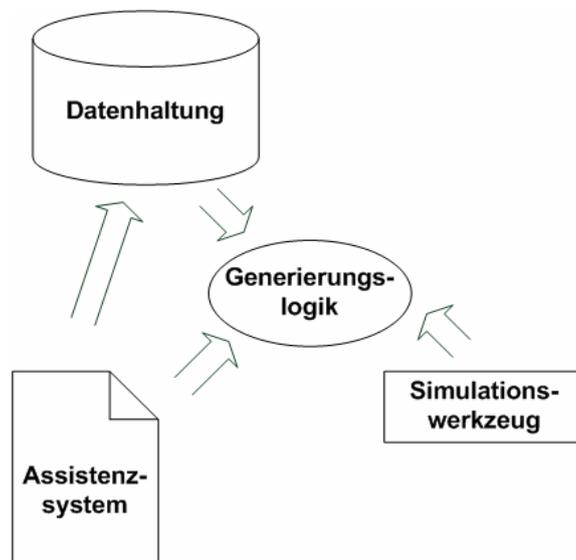
Eine dynamische Modellbildung auf Datenbasis beugt diesem Änderungskreislauf vor indem neue bzw. geänderte Modellelemente in der Datenbasis hinzugefügt bzw. geändert werden und nicht im Simulationsmodell selber [1-3]. Die Grundidee bei der datenorientierten Modellbildung stellt also die Trennung der Modellerfassung vom verwendeten Simulationswerkzeug dar.

Bei der datenorientierten Modellierung werden die strukturellen Informationen des Modells in einem geeigneten Datenarchiv hinterlegt, d.h. nicht im Simulationswerkzeug erfasst, und stattdessen erst zur Laufzeit der Simulation zur Erstellung des Modells aus dem Datenarchiv ausgelesen und für die dynamische Generierung des Modells herangezogen, oder anders ausgedrückt werden die vom Simulationswerkzeug handhabbaren

Simulationsobjekte mit Hilfe einer definierten Logik (Generierungslogik) aus dem Datenarchiv gebildet [7].

Ausprägungsformen von datenorientierter Modellierung können von teil- bis vollautomatisch reichen. Teilautomatisch heißt dabei, häufig vorkommende Strukturteile des Modells werden automatisiert erstellt, um vor allem den Modellbildungsaufwand zu reduzieren. Es bietet sich an, eine Importfunktion des Simulationswerkzeugs zu nutzen, um Daten aus einem Speicher zu lesen und daraus Modellteile zu bilden.

Bei der vollautomatisierten Modellierung wird das komplette Simulationsmodell aus externen Daten generiert. Bild 2 zeigt die Grundkomponenten eines Modellbildungssystems bestehend aus der Datenhaltung zur Speicherung sämtlicher Modelldaten, der Generierungslogik zum Erstellen des Modells für das Simulationswerkzeug, welches die Simulation abarbeitet. Häufig ist der Einsatz eines zusätzlichen Assistenzsystems von Nöten, zur Konfiguration der Generierungslogik und weiteren Aufarbeitung der Modell-, bzw. der Simulationsergebnisdaten.



**Bild 2:** Komponenten eines Modellierungssystem.

### 3 Vor- und Nachteile

Je nach Anspruch der Simulationsstudie kann die datenorientierte Generierung des Simulationsmodells mehr oder weniger flexibel gestaltet werden. Je mehr Gestaltungsspielräume die automatische Generierung des Modells zulässt, desto langlebiger wird sich das Simulationsmodell erweisen. Langlebiger heißt hier, geringerer Aufwand zur Modellbildung bei veränderten Strukturdaten.

Erfolgt die Generierung des Modells nicht mit einer eigens aufbereiteten Datenbasis, sondern direkt aus dem Datenarchiv der Geschäftsdaten anhand spezieller Konvertierungen, so lässt sich im Prinzip die reale Geschäftswelt in der Simulation widerspiegeln und

kontinuierlich bewerten [7]. Die Simulation wird somit in die Werkzeuglandschaft des Unternehmens integriert.

Des Weiteren werden vom Modell benötigte Teile erst zur Laufzeit nach Bedarf geladen, was die Auslastung des Systems reduziert. Dies erfolgt z.B. in sogenannten What-If Entscheidungsblöcken, bei denen nur der nachfolgend benötigte Bereich tatsächlich gebildet wird. So könnten einzelne Regalsysteme nur zu dem Zeitpunkt ins Modell geladen werden, wenn auch tatsächlich Artikel zur Ein- oder Auslagerung anstehen.

Eine Implementierung der Generierungslogik als Middleware bietet mehr Unabhängigkeit vom Simulationswerkzeug, welches dadurch austauschbar wird. Zusätzlich können sich andere Informations- und EDV-Systeme des Unternehmens die Funktionalität der Middleware zunutze machen [6].

Software-technisch ergibt sich eine Trennung des Quellcodes der Generierungslogik vom eventuell benötigten Quellcode in der Simulation selber. Dies entspricht gängigen Mustern in der Software-Entwicklung und unterstützt die Bearbeitung in Teams.

Synergieeffekte lassen sich auch auf Datenebene erzielen. So setzt die Generierungslogik einen bestimmten Konsistenzgrad der Daten voraus bzw. können beim Auftreten von Fehlern Rückschlüsse auf Datenmängel gezogen werden [6].

Der systematische Einsatz datenorientierter Modellbildung ist ebenfalls ein Schritt zu vereinheitlichten Simulationsmodellen. Die Nutzung von standardisierten Datenaustauschformaten tut ihr Übriges dazu.

Ein entscheidender Nachteil liegt im intensiveren und dadurch teureren Entwicklungsaufwand der Generierungslogik zur Modellbildung. Dieser einmalig zu tragen kommende Kostenfaktor relativiert sich aber bei einer längerfristigen Nutzung der Simulationsstudie.

Ein und dieselbe Generierungslogik für mehrere unterschiedlich Problemstellungen bzw. Branchen zu entwickeln, erweist sich als sehr komplex, was dazu führt, dass eine Logik nur jeweils ähnlichen Anforderungen gerecht werden kann.

Des Weiteren muss das genutzte Simulationswerkzeug über eine Software-Schnittstelle zur Einbindung von eigenem Code verfügen oder eine geeignete Kommunikationsmöglichkeit mit der Generierungslogik bieten.

Je nach Einsatzgebiet und technologischen Voraussetzungen bietet die datenorientierte Modellierung eine Alternative zur herkömmlichen Modellbildung und Chancen zu längerfristigen Kostenersparnissen.

## **4 Umsetzung**

Lastdaten, was bedeutet, Eingabedaten der Simulation (z.B. Artikel und Aufträge die im benannten Regalsystem ein- und auszulagern sind), liegen aufgrund ihrer Menge tendenziell sowieso in einem Datenarchiv, sei dies nun eine Datenbank oder in Form einer Dateiablage. So ist es anzuraten, bestehendes Datenarchiv zu erweitern und die nötigen Modelldaten für die Generierung bereitzustellen. Dabei empfiehlt es sich auf ein bestehendes Datenaustauschformat zu setzen.

Im Rahmen unserer bisherigen Simulationsprojekte wurden mehrere verschiedene Verfahren zur datenorientierten Modellbildung umgesetzt und erprobt.

Bei weniger komplexen Anwendungsfällen empfahl es sich, die Generierung des Modells direkt aus dem Simulationswerkzeug heraus vorzunehmen, dessen Software-

Schnittstelle dafür lediglich einen Datenbankzugriff, sowie das Code-orientierte Erstellen der Simulationselemente ermöglichen muss. Ein Assistenzsystem (siehe Bild 2) ist zur bloßen Durchführung der Simulationsstudie nicht nötig. Die Generierungslogik wird hierbei ein integraler Bestandteil des Simulationswerkzeugs. Eine Überarbeitung der Strukturen im Datenspeicher kam der Generierungslogik zusätzlich entgegen.

Mit steigender Komplexität des Anwendungsfalles und damit zunehmender Verflechtung der Prozessabläufe in der Simulation, stießen wir schnell an die Grenzen des Simulationswerkzeugs. Es zeigte sich, die Auslagerung der Generierungslogik in ein separates System, erhöht den Anpassungsgrad an veränderte Simulationsanforderungen und vereinfacht somit die Bewerksstellung von Änderungen. Allerdings steigen die Anforderungen an die Kommunikationsfreundlichkeit des Simulationswerkzeugs mit der Außenwelt beträchtlich, was eine ausgereifte Software-Schnittstelle zum absoluten Muss macht. Ein Assistenzsystem fürs Datenmanagement erweist sich ebenfalls als Notwendigkeit. Selten liegen Geschäftsdaten in einer ausreichenden Qualität vor, eine Aufarbeitung und Anpassung der Speicherstrukturen daher ebenfalls unumgänglich.

Das Simulationswerkzeug arbeitet in allen Fällen als Master, was bedeutet, die Abarbeitung der Simulation bleibt in dessen Händen, während die Simulationselemente nach Bedarf bei der Generierungslogik angefordert werden. Je nach Umsetzung kann die Generierungslogik dabei auch mehr Verantwortung übernehmen wie z.B. das Verwalten von Ressourcen. Steht in unserem Regalbeispiel die Auslagerung eines Artikels an, so wird vom Simulationswerkzeug ein freier Stapler inkl. Fahrer von der Generierungslogik angefordert, der den Auftrag übernehmen kann. Das Simulationswerkzeug dient nun nur noch der Abarbeitung anstehender Aufträge in sogenannten Tasks. Es besteht die Möglichkeit, selbiges Simulationswerkzeug relativ zügig durch ein anderes zu ersetzen.

Die Kommunikation zwischen Simulationswerkzeug und Generierungslogik erfolgt über gegebene Software-Schnittstellen, der Informationsaustausch erfolgt zwar im Xml-Format, die Datenspeicherung aber aus Performanzgründen in einer leistungsfähigen Datenbank. Auch die Ergebnisse der Simulation werden im selben Datenspeicher abgelegt und von einem Assistenzsystem für den Kunden veranschaulicht. Es ergibt sich dadurch zusätzlich die Möglichkeit, Ergebnisdaten eines Simulationslaufes als Eingabeparameter für die nächste Simulation zu verwenden, z.B. dienen nicht verarbeitete Auslagerungsaufträge im Regalsystem als Anfangsbestand für eine folgende Simulation.

Der Implementierungsaufwand der Generierungslogik ist bei komplexen Problemstellungen nicht zu unterschätzen, nach unserer Erfahrung etwa das doppelte bis vierfache des Erstellens einer reinen Simulationsstudie mit Hilfe des bloßen Simulationswerkzeugs und damit das größte Manko der datenorientierten Modellierung.

Allerdings ist nach der Implementierungs- und Testphase der Simulationsexperte nicht mehr von Nöten, der Kunde ist selbständig in der Lage verschiedene Szenarien seines Anwendungsfalles zu simulieren, zu bewerten und zu vergleichen. Auch die Flexibilität hinsichtlich geänderter Modell- und Prozessstrukturen steigt beträchtlich, der Anpassungsaufwand der Generierungslogik fällt kaum mehr ins Gewicht.

Schwieriger bewerkstelligen lässt sich die Gestaltung der Generierungslogik zur Verwendung in mehreren unterschiedlichen Simulationsanwendungsgebieten. Kein Simulationsmodell ist wie ein Anderes, die Freiheitsgrade eingeschränkt. Gerade hier warten große Herausforderungen um eine allgemein verwendbare Generierungslogik zu schaffen.

## 5 Literatur

- [1] *Minghui Yang*: Using data driven simulation to build inventory model. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference.
- [2] *Catriona Kennedy, Georgios Theodoropoulos*: Towards intelligent data-driven simulation for policy decision support in the social sciences. School of Computer Sciences, University of Birmingham, UK.
- [3] *Samer Hassan, Luis Antunes, Juan Pavon*: A data-driven simulation of social values evolution. AAMAS 2009, 8<sup>th</sup> International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 10-15 May, 2009, Budapest, Hungary.
- [4] *Lothar März, Martin Saler*: Ein Analyse-, Planungs- und Entscheidungsinstrument für Lagerlogistikanwendungen, Advances in simulation for production and logistics applications, Markus Rabe (Hrsg.), Stuttgart 2008.
- [5] *Sigrid Wenzel, Anke Jauss*: Diskussion eines Benchmark-Verfahrens für den Vergleich von Simulationswerkzeugen in Produktion und Logistik, Advances in simulation for production and logistics applications, Markus Rabe (Hrsg.), Stuttgart 2008.
- [6] *Sigrid Wenzel*: Modellbildung und Simulation in Produktion und Logistik – Stand und Perspektiven, ASIM Workshop, Dresden 2009.
- [7] *Sven Jensen*: Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job Shop Fertigung, Dissertation Uni Kassel 2007.

# **eVehicleLib - Eine Modelica-Bibliothek zur Simulation von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben**

Steffen Kutter, Bernard Bäker

[kutter@iad.tu-dresden.de](mailto:kutter@iad.tu-dresden.de), [baeker@iad.tu-dresden.de](mailto:baeker@iad.tu-dresden.de)

Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik, Institut für Automobiltechnik Dresden, TU Dresden  
George-Bähr-Straße 1c, 01062, Dresden

Sebastian Langhammer

[sebastian.langhammer@daimler.com](mailto:sebastian.langhammer@daimler.com)

GR/AEP Powertrain Control / Daimler AG  
Mercedesstraße 137, 70546, Stuttgart

## **Kurzfassung**

In diesem Beitrag wird die objektorientierte Bibliothek „eVehicleLib“ zur dynamischen Simulation von konventionellen, hybriden und elektrischen Kraftfahrzeugen vorgestellt. Die Bibliothek kann sowohl zur energetischen und längsdynamischen Bewertung neuartiger Fahrzeuge als auch zur Entwicklung und Optimierung der erforderlichen Regelungsfunktionen (z.B. Betriebsstrategien) eingesetzt werden.

## **1 Einleitung**

Das gesellschaftliche Bedürfnis nach individueller Mobilität wird derzeit nahezu ausschließlich durch rein verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge gedeckt. Trotz signifikanter Verbesserungen des Verbrennungsprozesses und dem Einsatz innovativer Getriebetechnologien wie DCT<sup>1</sup> und CVT<sup>2</sup> ist der Wirkungsgrad besonders im Teillastbereich nicht zufriedenstellend.

Der Einsatz von elektrischen Maschinen im Antriebsstrang stellt neben verbrennungsmotorischen Maßnahmen (z.B. forciertes Downsizing) einen möglichen Weg zur Verbrauchsreduktion der Fahrzeuge dar. In einer ersten Entwicklungsstufe wurden dazu die bereits im konventionellen Fahrzeugbordnetz existierenden Elektromaschinen Generator und Starter erweitert, um Funktionen wie Start / Stopp des Verbrennungsmotors sowie Bremsenergieerückgewinnung darzustellen.

Derzeit in der Entwicklung befindliche Fahrzeuge erweitern das Leistungsspektrum der E-Maschine deutlich bis hin zur rein elektrischen Darstellung der erforderlichen Traktionsleistung. Erklärtes Entwicklungsziel ist dabei die Umsetzung rein elektrischer Fahrzeugkonzepte. Aufgrund der beschränkten Energiedichte ist der Einsatz von E-Fahrzeugen aktuell vorwiegend auf die urbane Mobilität beschränkt.

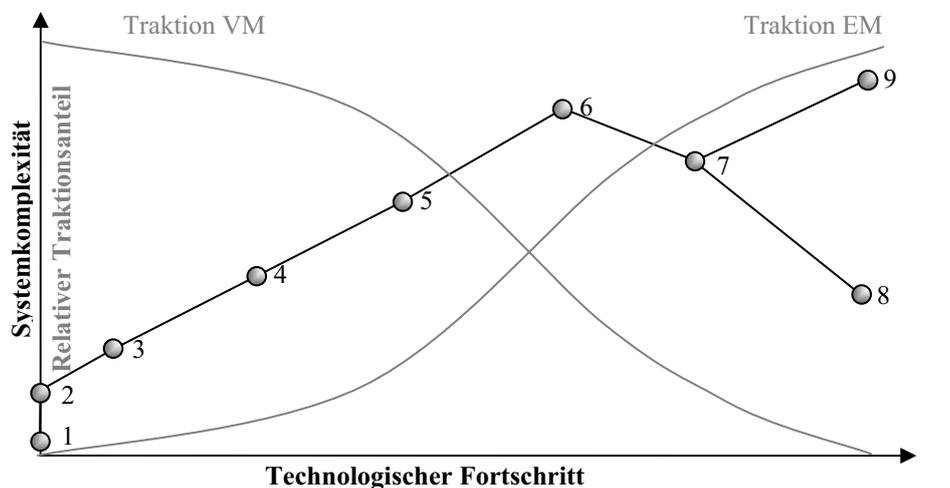
---

<sup>1</sup> Dual Clutch Transmission: Doppelkupplungsgetriebe, Direktschaltgetriebe

<sup>2</sup> Continuously Variable Transmission: stufenloses Getriebe

Hybridfahrzeuge stellen unter technologischen Aspekten einen komplexen Zwischenschritt auf dem Weg zum reinen Batterie- bzw. Brennstoffzellenfahrzeug dar. Sie bedingen infolge der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von Elektromaschinen und Verbrennungsmotor eine große Vielfalt an Antriebsstrangvarianten. Deren zusätzliche Freiheitsgrade gilt es sowohl strategisch durch ein entsprechendes Energiemanagement als auch durch den Entwurf geeigneter Komponentenregler zu beherrschen. Nur bei situationsgerechtem Wechsel zwischen den verschiedenen Betriebsarten von Verbrennungsmotor und Elektromaschine kann die durch die Hardware limitierte, maximale Verbrauchsreduktion erzielt werden.

Aufgrund der Vielzahl von zu bewertenden Fahrzeugkonzepten (**Bild 1**) und der hohen Kosten von Prototypenfahrzeugen wird sowohl die energetische Potenzialabschätzung als auch die Entwicklung von Regelalgorithmen und deren Funktionen weitestgehend modellbasiert durchgeführt [1], [2], [3].



- |   |  |
|---|--|
| 1 Konventionelles Fzg., manuelles Getriebe        | 6 Vollhybrid, Plug-In-fähig  |
| 2 Konventionelles Fzg., Automatikgetriebe         | 7 Elektro-Fzg. mit Range Extender,<br>ggf. mechanischem Durchtrieb |
| 3 Konventionelles Fzg., Start-Stopp, Rekuperation | 8 Elektro-Fzg.   |
| 4 Mildhybridfahrzeug                              | 9 Brennstoffzellen-Fzg.  |
| 5 Vollhybrid                                      |  |

**Bild 1:** Einordnung alternativer Antriebsstrangkonzepte bezüglich Systemkomplexität und Bereitstellung der Traktionsleistung

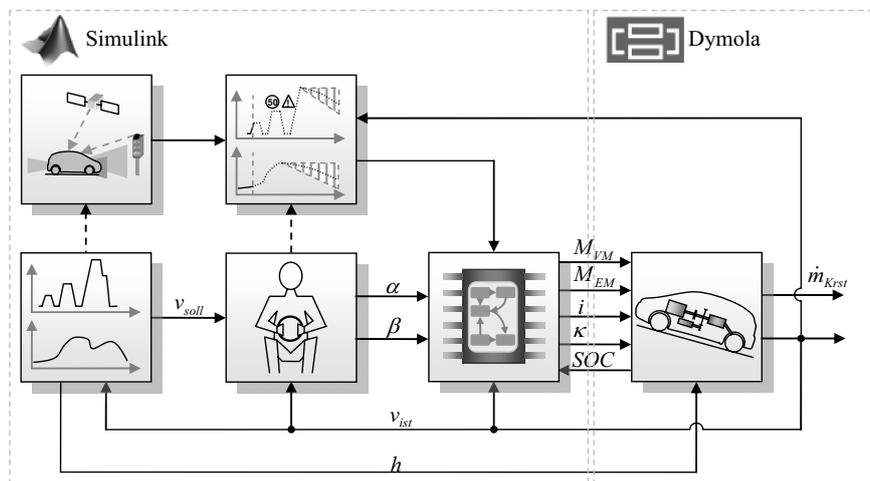
## 2 Modellierungsansatz

Aus der Zielstellung neben der Bewertung zukünftiger Antriebsstrangkonzepte bezüglich Fahrdynamik und Energiekonsum auch eine detaillierte Funktionsentwicklung vornehmen zu können, resultieren folgende Anforderungen an die Modelle:

- Abbildung des dynamischen Antriebsstrangverhaltens
- Exakte Abbildung der Energieflüsse und Wirkungsgrade
- Multiphysikalität zur Abbildung aller fahrzeugrelevanten Domänen

- Modularität zur beliebigen Erweiterung und Zusammenstellung von Systemen
- Beschreibungsmodelle für Funktionen (z.B. Zustandsautomaten, Petri-Netze)
- Implementierbarkeit von realem Steuergerätecode
- Möglichkeit zur automatisierten Code-Generierung
- Umsetzbarkeit auf kommerziellen Echtzeitsystemen
- Kompatibilität zu bestehenden Toolketten

Das Ziel energieeffiziente Betriebsstrategie- und Regelungsfunktionen für das Fahrzeug zu entwickeln, erfordert Möglichkeiten zur Einbettung bzw. Generierung von realem Steuergerätecode. Matlab Simulink und seine umfassenden Toolboxen haben sich hier als Quasi-Standard etabliert. Zudem wird diese Simulationsumgebung von zahlreichen Erweiterungen unterstützt, die die Einbindung externer Modelle (z.B. das Matlab-Dymola Interface) ermöglichen.



**Bild 2:** Struktur der Closed-Loop-Simulation eines Hybridfahrzeugs mit prädiktiver Betriebsstrategie; Zuordnung zu den Simulationsumgebungen (A: Vorausschaudatengenerierung; B: Prädiktionsdatenverarbeitung; C: Fahrumgebung; D: Fahrermodell; E: Betriebsstrategie, D Antriebsstrangmodell

Für die Modellierung der Strecke Antriebsstrang (**Bild 2**) mit den wesentlichen Komponenten Verbrennungsmotor, Elektromotor, Getriebe, Batterie [4], Bordnetz und Fahrzeuglängsdynamikmodell wurde ein ungerichteter, komponentenorientierter Ansatz unter Nutzung der Sprache Modelica verfolgt. Der akausale Ansatz ermöglicht die vorteilhafte Beschreibung der Komponenten basierend auf den physikalischen Wirkprinzipien in Form von differentialalgebraischen Gleichungen.

Die erforderlichen Modelle sind dabei nur teilweise in kommerziellen Bibliotheken wie z.B. „Smart Electric Drives“ oder „Powertrain Library“ verfügbar. Sie besitzen meist nicht den erforderlichen Detaillierungsgrad oder sind aufgrund des nicht offen zugänglichen Quelltextes nur bedingt verifizierbar, sodass der Aufbau einer eigenen, nur auf freien Modellen basierenden Bibliothek mit dem Namen „eVehicleLib“ forciert wurde. Diese wird im Folgenden auszugsweise vorgestellt.

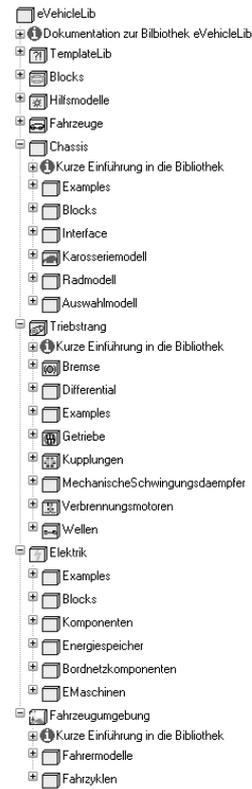
### 3 Bibliothek „eVehicleLib“

Die Gliederung der Bibliothek erfolgte anhand der Teilsysteme des Antriebsstrangs und Energiebordnetzes und ist in **Bild 3** dargestellt. Unabhängig von der inneren Modellierungsart und –tiefe (Momentan- / Mittelwertmodell, kausal / akausal) stellen sich die einzelnen Teilsysteme und Komponenten nach außen über einheitliche, physikalische Schnittstellen und Busse dar.

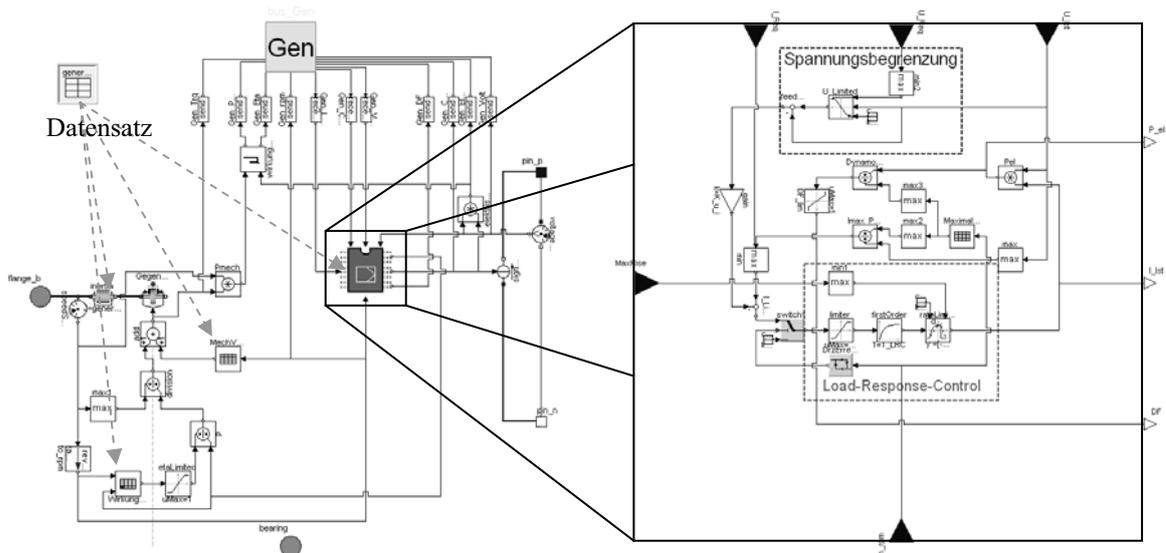
Die Modellierung der einzelnen Teilsysteme wurde dabei unter Trennung von Modell und Daten sowie separater Abbildung von physikalischem Verhalten und hardwarenaher Regelung umgesetzt. Dies wird exemplarisch am Modell des Bordnetzgenerators (**Bild 4**) aufgezeigt.

Ausgehend von einer reinen Schnittstellendefinition in einem partiellen Modell erfolgt im Basismodell die Erweiterung um die physikalischen Modellgleichungen und das Objekt Generatorregler bis zur vollen Funktionsfähigkeit. Das Basismodell besitzt allerdings nur Standardwerte für die einzelnen Systemparameter und ist somit nicht sinnvoll simulierbar. Erst mit der Erweiterung um einen auswählbaren Datensatz werden die Parameter eindeutig bestimmt und eine sinnvolle Simulation ermöglicht.

Dieses Vorgehen verhindert durch den direkten Datensatzzugriff die Simulation inkonsistenter Modelle und ermöglicht mittels Beschränkung der Datensatzweitergabe die Detaillierung der Modelle durch Dritte unter Wahrung der Geheimhaltungsanforderungen.



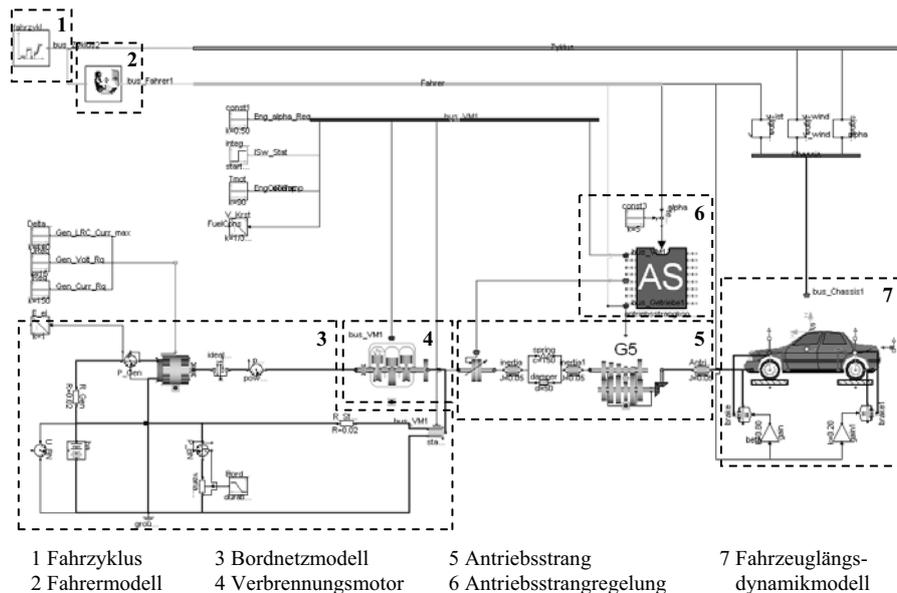
**Bild 3:** Struktur der eVehicleLib



**Bild 4:** Modell des Bordnetzgenerators (links) mit Regler (rechts)

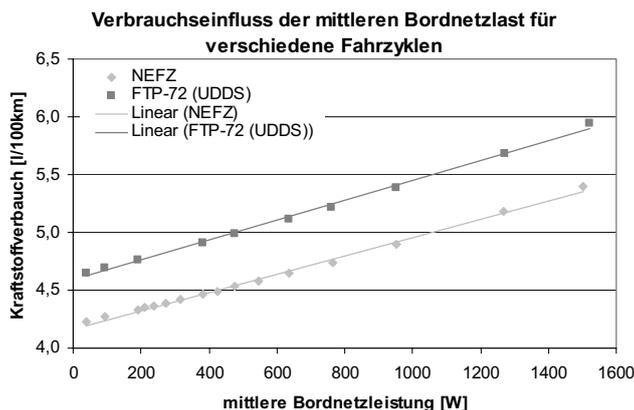
## 4 Einsatzbeispiele der „eVehicleLib“

In diesem ersten Anwendungsbeispiel der „eVehicleLib“ steht die Untersuchung des Verbrauchseinflusses der Bordnetzleistung für ein konventionelles Fahrzeug im Mittelpunkt. In **Bild 5** ist das dafür aufgebaute Gesamtfahrzeugmodell dargestellt.



**Bild 5:** Konventionelles Gesamtfahrzeugmodell in Dymola

Für eine korrekte Bilanzierung wurde auf einen ausgeglichenen Ladezustand der Batterie geachtet. **Bild 6** zeigt die für verschiedene Fahrzyklen ermittelten Kraftstoffverbräuche in

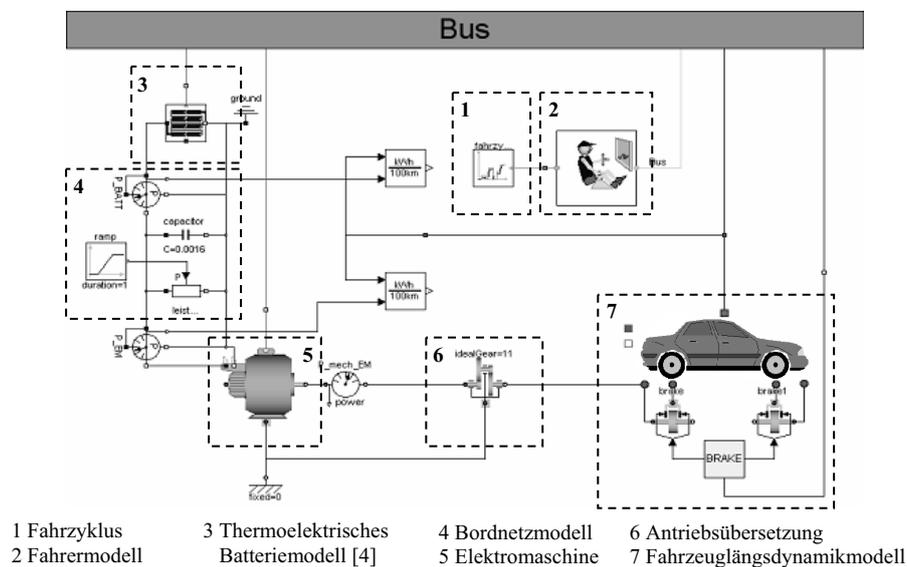


**Bild 6:** Verbrauchseinfluss der Bordnetzleistung

Abhängigkeit von der Bordnetzlast. Etwa 200 W stellen den Bereich der durch die Motorsteuerung eingepprägten Grundlast des Fahrzeugbordnetzes dar. Der im NEFZ<sup>3</sup> ermittelte streckenbezogene Kraftstoffverbrauch von 4,3 l/100km ist dabei identisch der Werksangabe des Realfahrzeugs. Für die beiden untersuchten Fahrzyklen ergibt sich ein linearer Anstieg des Kraftstoffverbrauchs über der Bordnetzleistung. Der Anstieg

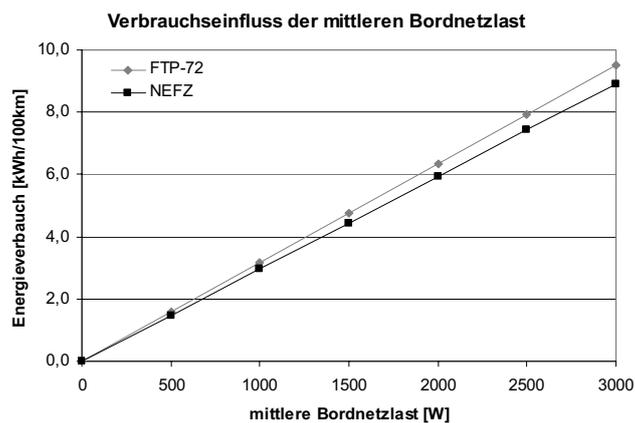
<sup>3</sup> Neuer Europäischer Fahrzyklus

liegt mit  $0,79 \frac{l}{100km \cdot kW}$  im NEFZ bzw.  $0,86 \frac{l}{100km \cdot kW}$  im FTP-72<sup>4</sup> im Bereich der gemein-  
hin bekannten Faustformel mit etwa 1 l je 100 km pro 1 kW elektrischer Bordnetzlast [5].



**Bild 7:** Modell eines E-Fahrzeugs in Dymola

Im zweiten Beispiel wird der Einfluss der beiden Faktoren Gewicht und Nebenverbraucherleistung eines reinen Elektrofahrzeugs untersucht, um z.B. Aussagen über den Reichweiteneinfluss der Batteriemasse sowie der zu elektrifizierenden Nebenverbraucher zu treffen. Zugrunde liegt ein Fahrzeugmodell mit direktem Antrieb durch einen Elektromotor mit einer festen Übersetzung (**Bild 7**). Als Referenzfahrzyklen werden auch hier der NEFZ und der FTP-72 verwendet.



**Bild 8:** Nebenverbrauchereinfluss

Aus den Variationsrechnungen für den Nebenverbrauchereinfluss resultiert wie beim konventionellen Antriebsstrang ein zyklusabhängiger, linearer Zusammenhang zwischen Bordnetzlast und Mehrverbrauch (**Bild 8**). Aus dem erhaltenen linearen Zusammenhang können nun die Einflussfaktoren (A) berechnet und für die Bestimmung eines bordnetzlastbedingten Mehrverbrauchs verwendet werden.

<sup>4</sup> Federal Test Procedure 72: US Fahrzyklus

Einflussfaktoren der Bordnetzlast A:

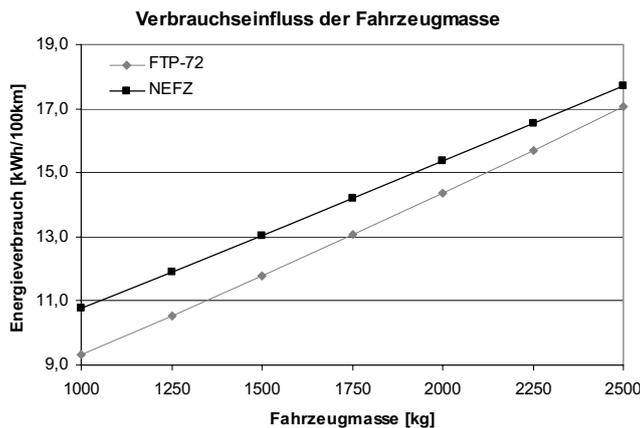
$$A_{NEFZ} = 0,3 \frac{kWh}{100km \cdot 100W}$$

$$A_{FTP72} = 0,32 \frac{kWh}{100km \cdot 100W}$$

Diese Einflussfaktoren müssen insbesondere infolge der Elektrifizierung der Klimaanlage mit erforderlichen mittleren Antriebsleistungen von 180 W bis 2 kW [6] beachtet werden, um eine aus Kundensicht belastbare Reichweiteangabe auszuweisen.

Bei Betrachtung eines typischen Elektrofahrzeugs bedeutet die volle Leistungsanforderung des Klimakompressors von 2 kW bei einem mittleren Traktionsenergiebedarf von etwa  $15 \frac{kWh}{100km}$  (z.B. NEFZ) einen um 40% (6 kWh) erhöhten Energiekonsum bzw. eine Reichweitenreduktion auf etwa 71% des Ausgangswertes.

Ähnlich dem linearen Zusammenhang bei der Nebenverbraucherleistung verhalten sich die Ergebnisse bei einer Variation der Fahrzeugmasse. Auch hier kann eine annähernd lineare Abhängigkeit des Energiebedarfs nachgewiesen werden (**Bild 9**). Es wurde ein Fahrzeug simuliert, bei dem alle Bremsmanöver rein elektrisch realisiert werden.



**Bild 9:** Gewichtseinfluss

Vergleichsrechnungen, bei denen jeweils nur 50% des geforderten Bremsmoments elektrisch gestellt werden, zeigen, dass das annähernd lineare Verhalten erhalten bleibt und nur der Einflussfaktor (B) größer wird.

Einflussfaktoren der Fahrzeugmasse B:

$$B_{NEFZ} = 0,46 \frac{kWh}{100km \cdot 100kg}$$

$$B_{FTP72} = 0,52 \frac{kWh}{100km \cdot 100kg}$$

Vergleicht man den Einfluss von Masse und Bordnetzleistung beim Elektrofahrzeug, so wird erkennbar, dass eine Reduktion der mittleren Bordnetzleistung um 100 W unter den gegebenen Randbedingungen denselben Effekt wie eine Verminderung der Fahrzeugmasse um etwa 63 kg besitzt. An dieser Stelle wird erkennbar, dass mit zunehmender Elektrifizierung des Fahrzeugs neben den klassischen Domänen des Automobilbaus (z.B. dem Leichtbau) das Energiemanagement zunehmend an Bedeutung gewinnt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Berichtes erfolgte eine kurze Vorstellung einer Bibliothek zur Modellierung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in der Modelliersprache Modelica. Es wurden erste Systemmodelle und ihre Anwendung zur Untersuchung energetischer Aspekte, insbesondere des Verbrauchseinflusses von Bordnetzlast und Fahrzeuggewicht vorgestellt.

In weiteren Arbeitsschritten werden jetzt Fahrzeugmodelle realer Hybridfahrzeugprototypen erstellt und mit Messdaten abgeglichen. Als Schnittstellengrößen zu einem überlagerten Steuerungs- und Regelalgorithmus stellen diese Modelle die der realen Fahrzeugvernetzung entsprechenden Informationen zur Verfügung. In einer ersten Testphase wird dann ein solches Fahrzeugmodell mit den bereits lauffähigen, simulinkbasierten Steuerungs- und Regelalgorithmen der aktuellen Fahrzeugprototypen betrieben. Bei ausreichend stabiler Umsetzung dieser Kombination mit hinreichender Rechengeschwindigkeit steht dem Entwickler ein neues leistungsfähiges Simulations- und Softwareentwicklungstool zur Verfügung. Dieses kombiniert die Verständlichkeit der physikalischen Streckenmodellierung von Modelica mit der Matlab Simulink-basierten Softwareentwicklungstoolkette.

Inwiefern sich dieser Ansatz langfristig gegen die bisherigen, gut erprobten und rein Simulink-basierten Modellierungsansätze durchsetzen kann, wird in nicht unentscheidendem Maße zum einen von der Weiterentwicklung der Anwenderfreundlichkeit von Dymola bzw. anderen Modelica-Interpretern und zum zweiten von der intuitiven Bedienbarkeit des Interfaces zur Kopplung der beiden Simulationswelten abhängen.

## Literatur

- [1] *Back, M.*: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Dissertation, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe, 2005.
- [2] *Kutter S.*: Theoretische und simulationsgestützte Untersuchungen zur Optimierung an einer vorhandenen Hybridfahrzeugarchitektur, Diplomarbeit, Institut für Automobiltechnik (IAD), Technische Universität Dresden, 2006.
- [3] *Looman, C.; Jost, A.; Bäker, B.*: Schwingungsarten, Einflussmöglichkeiten und zukünftige Regelansätze im hybriden Antriebsstrang. 29. Tagung „Elektronik im Kraftfahrzeug“, Dresden, 23./24. Juni 2009.
- [4] *Morawietz, L.; Kutter, S.; Falsett, R.; Bäker, B.*: Thermoelektrische Modellierung eines Lithium-Ionen-Energiespeichers für den Fahrzeugeinsatz. 6. VDI-Tagung „Innovative Fahrzeugantriebe“, Dresden, 6./7. November 2008.
- [5] *Büchner, S.*: Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen. Dissertation, Institut für Automobiltechnik, Technische Universität Dresden, 2008.
- [6] *Van Basshuysen R., Schäfer, F.*: Handbuch Verbrennungsmotor. 3. Ausgabe, Vieweg und Teubner, 2005.

# **Iterative development of assistance and automation systems based on enhanced simulation and test beds**

Andreas Richter, Tobias Lorenz and Frank Köster  
Andreas.Richter@dlr.de, Tobias.Lorenz@dlr.de, Frank.Koester@dlr.de  
DLR (German Aerospace Centre), Institute of Transportation Systems (TS)  
Lilienthalplatz 7, 38108 Brunswick, Germany

## **Abstract**

One motivation for the development of assistance and automation systems within the automotive domain is the support of safety and efficiency of traffic. Therefore, an iterative design process for adequate (considering human factors) and reliable (in particular safe) systems is essential. In the following article the steps within this iterative design process as well as the necessary instruments are described. Thereby, the described instruments are provided by research and development projects of TS focusing on different aspects of the development of assistance and automation systems. These projects deal with the automatic generation of virtual environments from data gathered in real world, a standardized architecture for test beds and field operational tests as well as the overall software architecture for distributed assistance and automation systems used at TS. Finally, the importance of these projects as well as the simulator facilities of TS within the iterative design process will be described. The interaction of these projects increases the efficiency when developing new applications at TS. Due to this iterative design process the consideration of safety related issues of new assistance and automation systems can be ensured on every stage of development process.

## **1. Introduction and Motivation**

Research activities at the Institute of Transportation Systems (TS) at the German Aerospace Centre (DLR) focus on increasing safety and efficiency of traffic. For example, this includes development of assistance and automation systems within the automotive domain. Therefore, an iterative design process for adequate (considering human factors) and reliable (in particular safe) systems is essential [1]. This design process creates a high demand on technical instruments accompanying different stages of development like collection of requirements, coding, testing etc. The assessment of system prototypes with e.g. focus on driver behavior and acceptance is important and in many cases supported by using different types of simulators, test vehicles, and other test facilities is additionally to the development of technical components.

This paper describes essential stages and associated instruments within an iterative development process for assistance and automation systems. Thereby, the described instruments are provided by research and development projects of TS concerning different areas of research. The projects sketched in this article deal with the automatic generation

of virtual environments from data gathered in real world, a standardized architecture to build up test beds and field operational tests (FOT) as well as the overall software architecture used at TS. Especially, the integration of the different development instruments into an overall design process and the seamless transition between simulation and reality is described.

## 2. Iterative development of assistance and automation systems

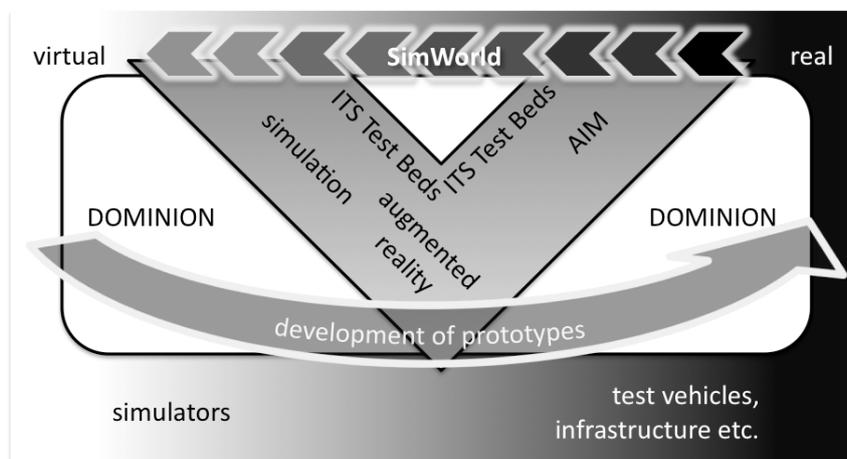
The iterative use of different development instruments and their further improvement is subject of many research and development projects at TS. Instruments of special interest for this article are:

- enhanced simulation (interdisciplinary project *SimWorld*) for realistic virtual worlds and a special
- software architecture (project *DOMINION*).

They are important building blocks for different research facilities at the DLR:

- different kinds of simulators/simulations,
- test beds (pan-European project *ITS<sup>1</sup> Test Beds* / project *AIM<sup>2</sup>*).

**Figure 1** shows these instruments as well as the mentioned research facilities as they are arranged in an abstract development process.



**Figure 1:** Overview of integrating and core instruments.

The development process is presented as a V-process. The standardized test bed architecture within the whole process is provided by the project ITS Test Beds. In this process

<sup>1</sup> Intelligent Transportation Systems

<sup>2</sup> Application-Platform for intelligent Mobility

starting with simulation end up with field operational tests (project AIM). The interdisciplinary project SimWorld decreases the gap between reality and virtual environment by creating virtual environments based on real world data. Within this whole development process the underlying service oriented software architecture is provided by DOMINION.

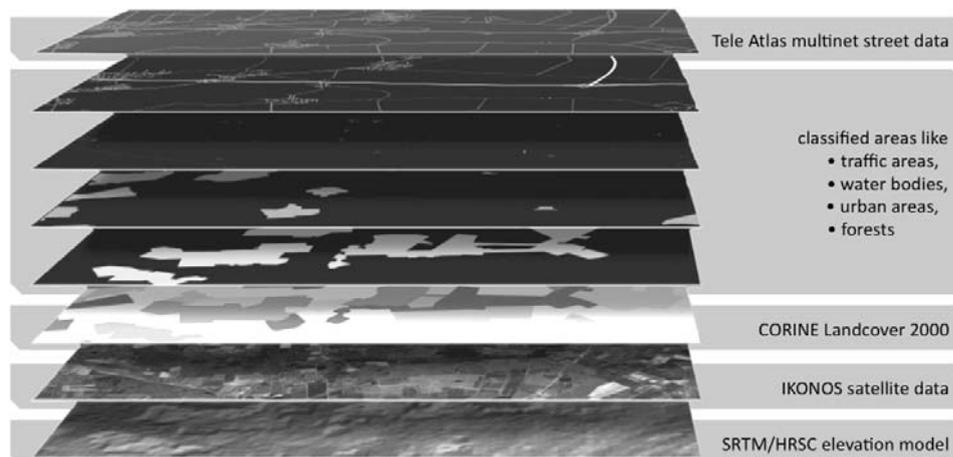
In many cases, prototyping starts in simulation and advances over test beds towards FOT with real vehicles. Further parts of this paper will refine details of these activities and related instruments and projects.

## 2.1 Enhanced simulation

Automotive software development cannot be imagined without simulation, including vehicle and traffic simulation. At TS, different kinds of simulators are available such as variants of virtual reality laboratories (e.g. a CAVE or a specialized HMI-Laboratory) or a motion simulator containing a real vehicle on a motion platform. They vary in level of immersion due to different kinds of techniques like stereoscopic view or motion cueing.

The project *SimWorld* provides a realistic landscape enhanced by real world data to all simulators [2].

The main element of SimWorld is the SimWorld database. In this database all available/necessary data will be stored in a generic way. The storage format is mainly stamped by requirements derived from 3D scene graphs like OpenSceneGraph [3] representing the environment and the mark-up language OpenDRIVE [4] defining road networks in a detailed way. Different importers are developed to convert relevant data into this generic format. Therefore, the suitable data could be gathered by remote sensing (classified data), by GIS<sup>3</sup> or by navigation data like shown in figure 2. Even data gathered on a custom way, like image processing of a video recording is conceivable.



**Figure 2:** Integration of available data sources.

Out of this data the SimWorld prototype generates a logical road network and realistic landscapes. The road network contains all necessary information for traffic simulation.

---

<sup>3</sup> geographical information system

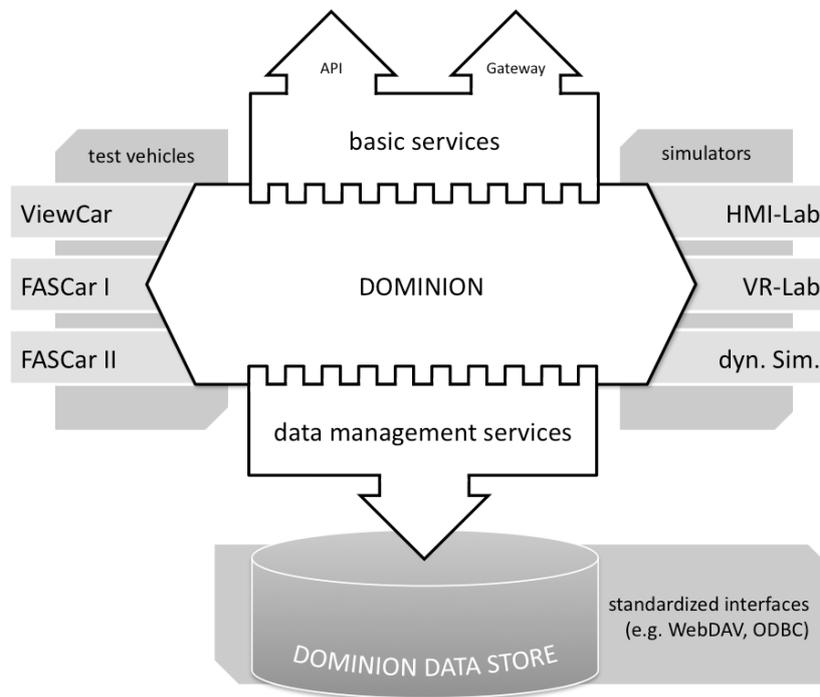
The landscape is generated as a 3D model and will be used for driving simulators. Along with logical and 3D file generation, metadata of surrounding scenery will also be available in the SimWorld database. With this data it will be possible to simulate sensors like radar and lidar in a more realistic way, because of reflection rates for certain objects stored in the database.

The data sets are extendable at any time. New areas can be introduced via importing new gathered data or can be set up by hand. Both cases speed up preparation of the experiment because landscape modeling is omitted.

Thus it will be easy to get existing real world test track models or whole areas into a simulated environment working on the same database. The accuracy of simulation can be enhanced within an acceptable time frame. Furthermore, the comparability of results between simulation and real world tests become even more significant.

## 2.2 Software architecture

The implementation of a transition between simulation and reality involves high technical effort supplying base services on the hardware and software level. To handle this, TS developed a software architecture concept called *DOMINION* [5]. *DOMINION* is inspired by the idea of service oriented architecture [6]. Following the concept of service-orientation, base services like hardware access are encapsulated in reusable and loosely coupled services.



**Figure 3:** Structure of DOMINION.

For any use-case (test facility) a certain set of base services is provided for flexible orchestration of new assistance and automation functions. Furthermore, DOMINION also

features monitoring and logging of data for fast assessment of experiment data. Figure 3 presents the architecture of DOMINION connected to the test facilities of TS.

Every service has access to the DOMINION communication bus to get and set the values of its defined input and output elements. Using a semi-formal description these data elements and services as well as their relations are defined implementation independent. Additionally, all runtime data can be made available in a data base called DOMINION Data Store. Via this database it is possible to analyze data collected during test with third party tools or to replay data for components simulation.

Code templates for different implementation environments are generated through an automatic code generation based on the semi-formal description of services and data elements. These templates include routines for the application code as well as the application adapted DOMINION-Middleware. Thus it is possible to run the services as a distributed system. Thereby DOMINION works as multi-platform system.

DOMINION provides a service oriented architecture allowing the iterative use of services (like hardware access or data logging) within every step of development process: simulator tests, test bed tests (ITS Test Beds) and FOT (AIM). Thus the comparability on the level of architecture framework is assured on every stage of development process.

### 2.3 Test beds

During iterative development of assistance and automation systems in prototype development different steps are reasonable. Thereby, a test bed covers the stages of prototype development, starting in a laboratory like controlled environment with many simulation aspects and reaching to field-operational tests (FOT) within a real world environment including many unpredictable incidents (see fig. 1).

Within the iterative design process at TS these stages of prototype development are mainly focused. In the following section the project *ITS Test Beds* and its impact on the project AIM is described. In ITS Test Beds [7] an international accredited harness for building up test beds and performing tests will be set up. In order to conduct such tests and evaluations, the upcoming DLR application-platform for intelligent mobility (AIM) will be facilitated.

ITS Test Beds distribute and establish guidelines and standards that support the already described development stages by providing a reference architecture, implementing support tools and software platforms to test and run innovative ITS solutions. Overall goal of ITS Test Beds is to standardize this design stage and cover all aspects of this crucial development stage to make it (re)useable for a broad range of heterogeneous ITS applications with different demands to the involved infrastructure.

In terms of iterative development, the open and flexible reference architecture promotes manageability of components, interfaces and processes. The main parts of ITS Test Beds are the technical administration (making infrastructure data available) called test bed and the application-specific administration (like management of tests, data management and analysis) called tests, technologies and analysis. Further details are shown in figure 4. The reusability of components is supported due to the service-oriented nature of the architecture.

The project *AIM* will be one of the first platforms complying with standards and architectures developed in ITS Test Beds.

One of the goals of the project AIM is the investigation and evaluation of effects of cooperative applications on traffic efficiency and safety within the real world environment. Thereby the integration, interoperability and reliability of different components and technologies especially in case of communication are essential. These results can then be compared to the results from the already done tests within simulator, test bed and test site.

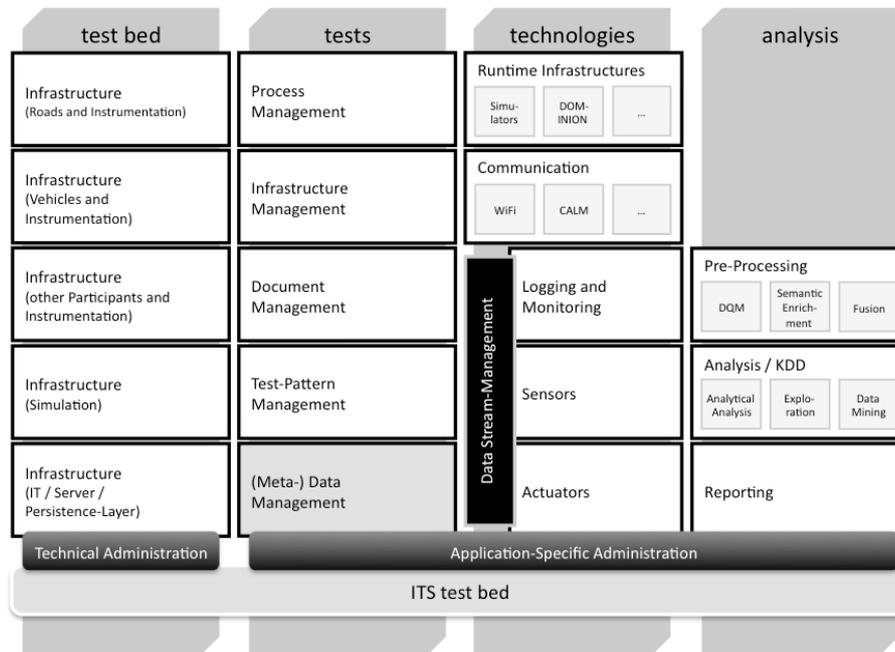


Figure 4: Reference architecture of ITS Test Beds.

### 3. The importance of the described instruments within the iterative development process

The iterative development of new assistance and automation systems at TS covers different stages (see fig. 1) which are necessary to test and evaluate this system continuously at every stage within development process. Therefore it is necessary to provide a comparable standardized test bed architecture which is valid at every development stage. This will be done by the project ITS Test Beds. In the first stage of development process the system under test is evaluated within a laboratory like, controlled environment by using the simulator facilities of TS. Thereby, the project SimWorld provides a toolchain to generate a virtual environment based on real world data to be used in the simulations. After running these tests successfully the next step is the evaluation under real world conditions but with a controlled environment e.g. test tracks. Finally the system has to be verified within real traffic. Therefore in AIM an application-platform for intelligent mobility will be build up also based on the architecture concept of ITS Test Beds to assess new applications in a real world environment. Due to the toolchain that is provided by SimWorld, where the location in the virtual environment is based on the real world data of the sce-

nario within AIM, the gap between simulation and reality could be reduced. Furthermore, the comparability of underlying software-architecture for implementing and running the applications to be tested can also be ensured at all development stages by using the service oriented architecture of TS DOMINION.

## 4. Conclusion

Developing new assistance and automation systems at TS includes different stages. These stages and their role within the development process impose different technical requirements on the described instruments. More realistic simulations are provided by SimWorld. Realizing test beds and building up test areas for field operational tests as well as SimWorld further decrease the gap between simulator based experiments and tests in real traffic. Therefore ITS Test Beds will provide an accredited reference architecture to build up test beds as well as to set up FOTs. Technical development of assistance and automation systems with these instruments is simplified by using service-oriented software architecture DOMINION. The development process provides guidelines and support for setting up and performing tests within automotive domain. Hence, using the described instruments engineering is more time and cost efficient.

## 5. References

- [1] *J. Gačnik, H. Jost, D. Beisel et al: DeSCAS Design Process Model for Automotive Systems – Development Streams and Ontologies.* , in SAE International, 2009.
- [2] *N. Sparwasser, M. Stöbe et al.: SimWorld – Automatic Generation of realistic Landscape models for Real Time Simulation Environments – a Remote Sensing and GIS- Data based Processing Chain.* in International Road Safety and Simulation Conference, Rome, 2007.
- [3] *OpenSceneGraph:* <http://www.openscenegraph.org/projects/osg/wiki/Support/KnowledgeBase/SceneGraph>
- [4] *OpenDRIVE:* <http://www.opendrive.org/projectBackground.htm>
- [5] *J. Gačnik, O. Häger, M. Hannibal: A service-oriented architecture for the human centered design of intelligent transportation systems,* in European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems, Lyon, April 2008.
- [6] *F. Köster, J. Gačnik, M. Hannibal: Serviceorientierung als Zugang zur Strukturierung von In-Vehicle Softwaresystemen,* in 4. Braunschweiger Symposium: IMA 2008 Informationssysteme für mobile Anwendungen, Brunswick, 2009.
- [7] *ITS Test Beds Portal:* <http://www.itsnomadic.net/itstb/>

# **Ausprägungen und Nutzungsgrad der Logistiksimulation im Umfeld der Automobilindustrie**

Hannes Müller-Sommer und Steffen Strassburger  
hannes.mueller-sommer@tu-ilmenau.de  
steffen.strassburger@tu-ilmenau.de  
Fachgebiet Wirtschaftsinformatik für Industriebetriebe  
Technische Universität Ilmenau  
Helmholtzplatz 3, 98693 Ilmenau

## **Kurzfassung**

In Wissenschaft und Praxis wird die Materialflusssimulation für eine Vielzahl von Anwendungsszenarien in Produktion und Logistik verwendet. Fokus dieses Beitrags sind die unter dem Oberbegriff „Logistiksimulation“ im automobilen Umfeld zusammengefassten Ausprägungen dieser Simulationsmethode. Diese werden von den einzelnen Automobilherstellern in unterschiedlichen Detaillierungsgraden und unterschiedlichen Bandbreiten eingesetzt. Bisher konnten sich allerdings keine gemeinsamen Bezeichnungen für diese Ausprägungen der Logistiksimulation durchsetzen. Um einen einheitlichen Standard im Umfeld der automobilen Logistik zu definieren, wurde eine Umfrage bei den deutschen Automobilherstellern durchgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass aktuell vier Ausprägungen der Simulation im Bereich der Automotive-Logistik eingesetzt werden, die auf Grund ihrer Fragestellungen sehr unterschiedlich zu behandeln sind. Dies sind die Werkssimulation, die Belieferungssimulation, die Supply-Chain-Simulation und die Verkehrsflusssimulation. Durch die übergreifende Definition der verwendeten Simulationen, Festlegung der Betrachtungsumfänge und Systemgrenzen sowie die Rolle im Produktentstehungsprozess wird eine Vergleichbarkeit geschaffen. Auf der Basis dieser Standardisierung können Zusammenarbeitsmodelle vereinbart und gemeinsame Forschungsvorhaben angestoßen werden.

## **1 Motivation**

Um Planungen digital abzusichern werden in der Automobilindustrie seit etlichen Jahren erfolgreich Simulationen eingesetzt. Dies reicht von der Prozesssimulation von Umformprozessen über das Digitale Montage-Mock-Up bis zu Materialflusssimulationen [8]. Eine Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [13]. Die Reduktion von Planungs- und Produktionskosten [7] ist einer der Gründe für die zunehmende Verbreitung und Akzeptanz von Simulationen. Diese Kostenreduktion wird durch die Verlagerung der Absicherung aus der Praxis hin in die Digitale Fabrik [14] erreicht. Zudem wird die abteilungsübergreifende Zusammenar-

beit dadurch gefördert, dass ein gemeinsames Verständnis von den eingesetzten Systemen standardisiert vorgegeben wird.

Die diskret ereignisorientierte Simulation hat sich als Standardmethode für dynamische Absicherungen durchgesetzt [16]. Eine diskret ereignisorientierte Simulation berechnet den neuen Zustand eines Modells zu Ereigniszeitpunkten, während sich der Zustand des Modells zwischen Ereignissen nicht verändert. Daraus entwickelte sich das Werkzeug der Materialflusssimulation, das im Umfeld der Automobilproduktion etabliert ist [4]. Es existiert ein weites Spektrum kommerzieller Simulationstools, exemplarisch seien Plant Simulation (Siemens PLM), Witness (Lanner Group) sowie AutoMod (Brooks Automation) aufgeführt, die diese Methodik unterstützen. Diese Simulationstools haben sich in den letzten Jahren sowohl im Funktionsumfang wie auch in der Anwenderfreundlichkeit weiterentwickelt und geben heute Antworten auf die spezifische Fragestellungen. Dank der Schnittstellenversorgung (SST) von Produktionsplanungssystemen [6], [11], [12], der SST der Fördertechnik [15] und der SST der Prozess- und Layoutplanung [10] können Simulatoren (teil-)automatisiert Modelle aufbauen. Die Materialflusssimulation wird von allen deutschen Automobilherstellern (OEMs) als Absicherungs- und Optimierungswerkzeug verwendet, die unterschiedlichen Historien und Organisationsstrukturen lassen allerdings keine direkten Vergleiche bezüglich des Einsatzes und der Verbreitung von Logistiksimulationen zu [4]. Gerade aber diese Vergleichbarkeit bringt entscheidende Vorteile mit sich, ohne dass die OEMs ihre Kernkompetenzen offen legen, angefangen von dem gemeinsamen Begriffsverständnis über die Ausschreibung von Simulationsprojekten für Dienstleister bis hin zum gemeinsamen Erkennen von Handlungsfeldern für übergreifende Forschungsvorhaben.

In den letzten Jahren nahm der Einsatz der Simulationstools im Bereich Logistik deutlich zu. Auf Grund von inhomogenen Prozess-, Organisations- und IT-Landschaften der OEMs sind auch die Anforderungen an die verwendeten Simulationstools unterschiedlich. In der heutigen Zeit kann sich keiner der OEMs auf Grund von wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, gestiegener Variantenzahl und verschärftem Wettbewerbsdruck Unwirtschaftlichkeit leisten. Daher ist die Standardisierung der unterschiedlichen Logistiksimulationen wichtiger denn je. Ziel ist es, teure Mehrfachentwicklungen einzusparen, den Aufwand der jeweiligen Datenbeschaffung und Plausibilisierung inklusive Verifizierung und Validierung wirtschaftlich im Rahmen zu halten [9], [2]. Gleichzeitig werden mit einer gemeinsamen Strategie die daraus resultierenden Synergieeffekte wie ein gemeinsames Anforderungsmanagement gewinnbringend genutzt. Dies bezieht sich auf den kompletten Produktentstehungs- und Produktlebenszyklus. Das Ergebnis ist nicht nur die Reduktion der Kosten für alle Beteiligten, z.B. durch gemeinsame Entwicklungen, sondern schafft eine vergleichbare Tiefe von Logistiksimulationenprojekten auf der gemeinsamen Suche nach dem Optimum. Das Ergebnis dieser Umfrage mündet in der VDA-Handlungsempfehlung „Logistiksimulation“.

## **2 Methodisches Vorgehen**

Eine mit den Mitgliedern des VDA-UAG Ablaufsimulation durchgeführte Befragung hatte das Ziel, ein gemeinsames Verständnis der im VDA organisierten Simulationsexperten zum Thema Logistiksimulation zu schaffen und die unterschiedlichen Ausprägun-

gen der Simulation im Bereich Logistik einheitlich zu beschreiben. Diese Befragung wurde im Februar 2009 als strukturiertes Interview mit sechs Simulationsexperten der einzelnen OEMs durchgeführt. Die heterogenen Antworten wurden zusammengefasst (Bild 2) und mit den Simulationsexperten diskutiert und verabschiedet. Trotz des kleinen Stichprobenumfangs ist davon auszugehen, dass die Antworten der Teilnehmer ein substantiiertes Gesamtbild der momentan von den Automobilherstellern eingesetzten Logistiksimulationen widerspiegeln.

### **3 Definition der unterschiedlichen Logistiksimulation**

Die Fragestellungen der Umfrage adressieren die unterschiedlichen Simulationen, die im Bereich der Logistik von Automobilherstellern unter dem Begriff „Logistiksimulation“ zusammengefasst werden. Die zugrunde liegende Methode ist hierbei jeweils die diskrete ereignisgesteuerte Simulation, im Anwendungsfokus Materialflusssimulation. Diese wird in den einzelnen Gewerken sowie gewerkeübergreifend eingesetzt.

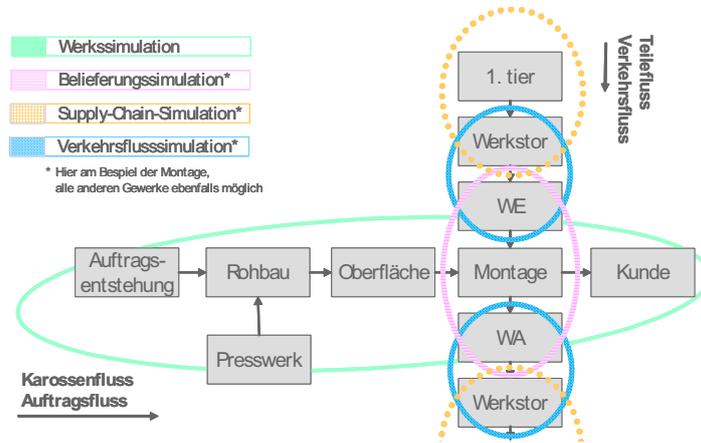
Im Kontext der Digitalen Fabrik wurde bisher als Anwendung der Materialflusssimulation insbesondere der Bereich Produktion betrachtet. Hier existiert unter den OEMs bereits ein breites gemeinsames Verständnis. In der Produktionssimulation steht das Werkstück selbst, d.h. die Karosserie, im Mittelpunkt der Untersuchung, betrachtet wird der Produktfluss durch die Produktion. Die Logistiksimulation wurde bisher nicht intensiv genug diskutiert, um ein gemeinsames Verständnis der im VDA-Unterarbeitskreis (UAG) Ablaufsimulation beteiligten Unternehmen zu schaffen, daher ist die Begriffswelt bisher sehr heterogen. In der Logistik treffen vier unterschiedliche Betrachtungsdimensionen aufeinander: der Auftrag/die Information (Auftragsfluss), das Werkstück (Karosseriefluss), die zu verbauenden Teile (Teilefluss, teilweise wird auch die Karosserie als Teil betrachtet) und das Transportmittel (Verkehrsfluss). Daraus lassen sich folgende Ausprägungen der Simulation identifizieren, die im Umfeld der automobilen Logistik angewendet werden:

- Werkssimulation
- Belieferungssimulation
- Supply-Chain-Simulation
- Verkehrsflusssimulation

Bild 1 gibt einen ersten Überblick über die in den einzelnen Ausprägungen der Logistiksimulationen betrachteten Simulationsumfänge. Diese unterschiedlichen Ausprägungen der Logistiksimulation wurden im Rahmen des strukturierten Interviews bezüglich der folgenden Kriterien untersucht (vgl. Bild 2):

- Betrachtungshorizont
- Systemgrenzen
- Gewerke
- Simulationszeitpunkt im Produktentstehungsprozess/Lebenszyklus
- Detaillierung
- Wiederverwendung

- Umfang
- Platz-/Längenorientierung



**Bild 1:** Unterschiedliche Ausprägung der Logistiksimulation.

## 4 Logistiksimulationen im Detail

Einen tabellarischen Überblick über die Untersuchung gibt Abbildung 2.

Definition <b>Logistiksimulation</b>	Betrachtung			Systemgrenze					Gewerk				PEP			Detaillierung					
	Auftragsfluss	Produktfluss (Werkstatt)	Teilfluss	Lieferant	Werkstor	Wareneingang	Bereitstellort	Warenausgang	Werkstor	Lieferant/Kunde*	Stufe1 (Presswerk)	Stufe2 (Karosseriebau)	Stufe3 (Oberfläche)	Stufe4 (Montage)	Konzeptphase	Planungsphase	Anlauf	Serie	stark abstrahiert	sehr fein	
Werkssimulation	x	x		werden nicht betrachtet							x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Belieferungssimulation			x			x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
Supply-Chain-Simulation	x	x	x							x											
Simulation Verkehrsfluss						x	x	x	x		Gewerkeunabhängig				x	x	x	x		x	x
			x								Gewerkeunabhängig				x					x	x

	Wiederverwend.		Umfang			Orientier							
	sehr hoch	hoch	niedrig	sehr niedrig	>3 Personen	1-3 Personen	Monate	1-4 Personen	Wochen	<1 Person	Woche	platzorientiert	längenorientiert
Werkssimulation	x	x										x	
Belieferungssimulation			x										x
Supply-Chain-Simulation				x								x	
Simulation Verkehrsfluss													x

**Bild 2:** Detaillierte Betrachtung der Logistiksimulationen.

### 4.1 Werkssimulation

Eine Werkssimulation ist die gewerkeübergreifende Simulation von starr verbundenen Kapazitäten. Starr bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Entkopplungspuffer zwischen den Gewerken mit einer endlichen Größe zur Verfügung stehen. Das Ziel der

Werkssimulation ist die Abbildung der gewerkeübergreifenden Prozesskette, um gesamtheitliche wie auch detaillierte Fragestellungen bearbeiten zu können [4]. Betrachtet werden zum einen der Produktfluss – der Weg der Karossen durch das Unternehmen. Zum anderen steht der Auftragsfluss, der Weg des Kundenauftrages mit seiner Reihenfolge im Fokus. Daraus lassen sich unter Anderem folgende Fragestellungen ableiten [4]:

- Bestimmung der Reihenfolgegüte, Verwirbelungsprofile
- Durchsatz hpv (hours per vehicle), Durchlaufzeiten
- Optimale Auslastung
- Steuerung der Gewerke
- Dimensionierung der Entkopplungspuffer zwischen den Gewerken
- Zusammenspiel unterschiedlicher Schicht- und Arbeitszeitmodelle

In der Regel werden Werkssimulationen mit einem abstrakten Detaillierungsgrad modelliert und eingesetzt. Der Aufwand für die Datenbeschaffung, Modellierung, Validierung & Verifikation sowie für Experimente ist, verglichen mit den anderen Ausprägungen, hoch. Grob betrachtet sind die einzelnen Gewerke als Black-Boxen dargestellt, was als Abbildungstiefe für die gesamtheitlichen Fragestellungen in der Regel ausreicht [4]. Für gewerkespezifische Fragestellungen können die einzelnen Black-Boxen weiter detailliert werden. Hierzu können z.B. Möglichkeiten der hierarchischen Modellierung verwendet werden, die einige Simulationswerkzeuge bieten (z.B. Plant Simulation über Unternetzwerke). Alternativ besteht auch die Möglichkeit der Modellkopplung über Standards wie die High-Level-Architecture [5], [1]. Wichtig ist hier allerdings die Beherrschbarkeit der Detaillierung [15]. Werkssimulationen werden über den gesamten Produktentstehungsprozess eingesetzt, meist wird das Modell über den Lebenszyklus auf dem aktuellen Stand gehalten. Aber auch bei relativ kleinen Projekten, beispielsweise einem geplanten Umbau eines Sortierpuffers, werden Werkssimulationen eingesetzt, um geplante Investitionen im Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit wie auf ihre Integration in das Gesamtnetz abzusichern. Dies spiegelt sich auch in einer hohen Wiederverwendung der einzelnen Modelle wider.

## 4.2 Belieferungssimulation

Die Belieferungssimulation untersucht das Zusammenspiel der unterschiedlichen Belieferungsprozesse mit den Einsatzfaktoren und dem Zusammenspiel mit anderen Gewerken. Die Belieferungssimulation legt ihren Fokus auf den Teilefluss. Das Simulationsmodell basiert auf dem Layout der Produktionshalle. Ziel ist es, die zu verbauenden Teile unter den logistischen Vorgaben termingerecht am Bereitstellort (BO) vorzuhalten, und dies mittels der Simulation dynamisch abzusichern. Auch eine Kopplung mit Montagesimulationen ist möglich, um die einzelnen Abrufe je BO exakt auf der Belieferungsseite simulieren zu können. Daraus lassen sich folgende Untersuchungen identifizieren:

- Betrachtung unterschiedlicher Versorgungsvarianten
- Versorgungssicherheit (Anzahl Abrisse) mit optimalem Lagerbestand am BO
- Abrufintervalle und Wiederbeschaffungszeiten
- Bestimmung der Einsatzfaktoren bspw. Anzahl und Auslastung von Staplern Glättung von Bedarfsspitzen

- Strategiebetrachtung (z.B. Teilebedarfssteuerung über Kanbankarten/Knopfabruf)
- Szenarienbetrachtung (z.B. staplerfreie Versorgung)

Die Systemgrenzen sind in der Regel der Wareneingang (Quelle) und der BO (Senke), für die komplette Abbildung inklusive der Entsorgungsprozesse sind die Systemgrenzen der Wareneingang und der Warenausgang. Belieferungssimulationen werden in allen Gewerken mit Logistikversorgung eingesetzt. Insbesondere das Presswerk, der Karosseriebau und die Montage haben durch einen entsprechenden Teileumfang eine hohe Simulationswürdigkeit. Um belastbare Ergebnisse von Belieferungssimulationen zu erhalten ist eine hohe Detaillierung notwendig. Dies bedeutet unter anderem, dass die einzelnen Routenzüge und Stapler mit dem zugehörigen Schichtmodell parametrisiert werden, im Idealfall sogar mit MTM-Werten (Methods-Time Measurement). Im Produktentstehungsprozess werden Belieferungssimulationen hauptsächlich in der späteren Planungsphase eingesetzt, wenn der Reifegrad der Belieferungsprozesse einen entsprechenden Stand erreicht hat. Aber auch in der Serie werden Belieferungssimulationen eingesetzt, unter anderem für Szenarien, weitere Baureihen auf einem Band zu fertigen. Durch die hohe Detaillierung und die spezifische Fragestellung ist eine Wiederverwendung der Simulation bisher nur mit großem Aufwand realisierbar, in der Praxis werden diese Modelle daher in der Regel nur selten nochmals eingesetzt. Der Erstellungsaufwand reicht von mehreren Personenwochen, beispielsweise für Kleinserien, bis hin zu Projekten, die sich über mehrere Quartale erstrecken können.

### 4.3 Supply-Chain-Simulation

Die Supply-Chain-Simulation bildet auf Grundlage des Supply-Chain-Managements [3] die Lieferkette von den Lieferanten bis zum Werkstor ab, weiter wird sowohl der Weg des fertigen Produktes zum Kunden oder der Rückweg des Leergutes zum Lieferanten betrachtet. Auch die Lieferkette zwischen den unterschiedlichen Werken innerhalb eines OEMs werden mit Supply-Chain-Simulationen untersucht, beispielsweise wenn der Antriebsstrang räumlich getrennt gefertigt und über das öffentliche Verkehrsnetz zur Montage geliefert wird. Ziel ist die organisatorische wie ökonomische Optimierung der Supply-Chain bei gleichzeitiger Sicherstellung der Versorgung. Hier lassen sich Untersuchungen aus folgenden Themenfeldern ableiten:

- Liefertreue, insbesondere im Rahmen des Global Sourcing
- Prozessoptimierung
- Wirtschaftliche Standortauswahl

Die Systemgrenzen der Supply-Chain-Simulationen sind der externe oder interne Lieferant sowie das Werkstor. Auf der anderen Seite sind die Systemgrenzen vom Werkstor bis zum externen oder internen Kunden bzw. die Leergutrückführung zum Lieferanten definiert. Das Modell ist in der Regel wenig detailliert, im Vordergrund stehen Aussagen zu Liefertreue und über die Prozessoptimierung. Das Zusammenspiel der unterschiedlichen Gewerke innerhalb eines OEMs wird in dieser Art der Simulation nicht betrachtet, diese Fragestellungen werden in Werkssimulationen abgebildet. Supply-Chain-Simulationen werden im kompletten Produktentstehungsprozess wie auch über den Life-

cycle eingesetzt, um die Belieferung abzusichern. Die niedrige Wiederverwendungsrate der Simulationsmodelle resultiert aus einem in der Regel wenig reproduzierbaren Szenario und langfristig abgeschlossenen Prozessen und Lieferverträgen. Der Erstellungsaufwand ist je nach Projekt unterschiedlich, es reicht von wenigen Personenwochen bis hin zu mehreren Personenmonaten.

#### **4.4 Verkehrsflusssimulation**

Die Simulation des Verkehrsflusses stellt eine wichtige, wenn auch überschaubare, Abbildung der Realität dar. Im Zentrum der Betrachtung stehen hier Untersuchungen zum innerbetrieblichen Werksverkehr. Ziel ist die optimale Austaktung und Aussagen zu der Verkehrswegebelaugung, beispielsweise das Verkehrsaufkommen bei der LKW-Anlieferung am Wareneingang. Daraus lassen sich Fragestellungen aus folgenden Themenfeldern ableiten:

- Aussagen zur internen Verkehrsbelastung
- Notwendige Anzahl von Abladestellen
- Anzahl der Parkplätze mit deren Auslastung und Vergabeschlüsseln
- Auslastung an den Werkstoren und an den Wareneingängen bzw. -ausgängen.

Die Systemgrenzen sind hier das Werkstor, ggf. der Parkplatz davor und der Wareneingang. Auf der anderen Seite ist es der Warenausgang und wieder das Werkstor. Die Detaillierung variiert je nach Aufgabenstellung, der Aufwand ist im Vergleich zu den anderen Logistiksimulationen allerdings relativ gering. Im Produktentstehungsprozess werden Verkehrsflusssimulationen in der Planung und in der Serie eingesetzt. Durch eine entsprechende Parametrisierung können auch Hüllkurvenuntersuchungen mit ausgewertet werden. Die Wiederverwendung dieser Modelle ist auf Grund der punktuellen Fragestellung recht gering, einzelne Module wie das Layout können jedoch auch von anderen Modellen verwendet werden.

### **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Diese Auswertung legt einen Grundstein für eine Standardisierung der Simulation im Logistikumfeld der im VDA organisierten Automobilhersteller. Identifiziert und beschrieben wurden vier Ausprägungen der Simulation, die im Bereich der Logistik zur Anwendung kommen. In den unterschiedlichen Dimensionen konnte festgestellt werden, wie differenziert die einzelnen Simulationen zu betrachten sind und wie sich diese von den anderen abgrenzen. Weiterhin leitet sich aus den Ergebnissen ein Handlungsbedarf dahingehend ab, wie z.B. der Wiederverwendungsgrad von Modellen erhöht und der Aufwand für die Modellerstellung reduziert werden kann.

Um eine Standardisierung herbeizuführen fließen die Erkenntnisse dieser Umfrage in eine Handlungsempfehlung des VDA zum Thema Materialflusssimulation in der Logistik ein, die bei allen im VDA organisierten Unternehmen kommuniziert wird. Gleichzeitig wird eine aufbauende Untersuchung bei durchgeführt, um diese unterschiedlichen Ausprägungen der Simulation eingehender zu vergleichen. Diese beinhaltet nicht nur die detaillierte Analyse des Ist-Standes, sondern identifiziert auch die unterschiedliche Orga-

nisation der Simulation in der Praxis. Diese Ausgangssituation bietet die Möglichkeit, auf den Standard weiter aufbauend wissenschaftlich neue Handlungsfelder zu identifizieren und diese in gemeinsamen Projekten voranzutreiben. Gerade in der heutigen Zeit ist dies wichtiger denn je.

## 6 Literatur

- [1] *Baier, J.*: Ein Beitrag zur simulationsgestützten Kostenanalyse auf Prozesskostenbasis in der Nutzfahrzeugproduktion. Shaker, Aachen, 2002.
- [2] *Baier, J.; Ruf, H.; Hill, H.*: Verknüpfung von Materialflusssimulation und Planungsdatenbanken. In *Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2006.
- [3] *Baumgarten, H. Hrsg.*: Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
- [4] *Bayer, J.; Collisi, T.; Wenzel, S.(.) Hrsg.*: Simulation in der Automobilproduktion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003.
- [5] *Institute of Electrical and Electronics Engineers*: High-Level Architecture (HLA), IEEE Standards 1516, 1516.1, 1516.2, IEEE-Publishing, New York, 2000.
- [6] *Jensen, S.*: Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job Shop Fertigung. Dissertation. University Press, Kassel, 2007.
- [7] *Krause, F.-L.*: Digitale Fabrik. In *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2001, 96; S. 84.
- [8] *Kuhn, A.; Rabe, M.(.) Hrsg.*: Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- [9] *Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S. Hrsg.*: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik, Vorgehensmodelle und Techniken. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] *Rooks, T.*: Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik, Dissertation. In (Bracht, U. Hrsg.): Innovationen in der Fabrikplanung und Organisation, Shaker Verlag, Aachen, 2009.
- [11] *Selke, C.*: Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung. Dissertation. In (Reinhart, G. Hrsg.): Schriftreihe Forschungsberichte iw. Utz Verlag, München, 2005.
- [12] *Splanemann, R.*: Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten. In (Universität Bremen Hrsg.): Bremer Schriften zur Betriebstechnik und Arbeitswissenschaft. Verlag Mainz, Aachen, 1995.

- [13] *Verein Deutscher Ingenieure*: VDI Richtlinie 3633-1 Simulation von Logistik- Materialfluss- und Produktionssystemen. Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [14] *Verein Deutscher Ingenieure*: VDI Richtlinie 4499-1 Digitale Fabrik, Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [15] *Wacker, R.*: Automatische Generierung von Simulationsmodellen auf Basis einer Socket-Lösung mit Planungsdatenbank und dem Simulationssystem Quest von Delmia am Beispiel des Montagewerkes 2 in Tuscaloosa/USA des Unternehmens DaimlerChrysler, Diplomarbeit, Sindelfingen, 2003.
- [16] *Wenzel, S.*: Modellbildung in der ereignisdiskreten Simulation. In (Arbeitsgemeinschaft Simulation Hrsg.): ASIM Nachrichten, 2002-2; S. 10–15.

# Physik und Systemwissenschaft in Aviatik

Werner Maurer  
maur@zhaw.ch  
idp/SoE/ZHAW

Technikumstrasse 9, Postfach, CH-8401, Winterthur

## Kurzfassung

Neu konzipierte, bereichsübergreifende Studiengänge wie Mechatronik, Wirtschaftsingenieur oder Aviatik bieten die Chance, Inhalte besser zu strukturieren, bergen aber auch das Risiko, sich in der Breite zu verlieren. Mit dem Schwerpunktfach Physik und Systemwissenschaft ist im Studiengang Aviatik ein Modul geschaffen worden, in dem der Lernstoff im Zusammenspiel von Vorlesung, Übungen und Labor vermittelt wird. So lernen die Studierenden im Modellbildungslabor anhand ausgewählter Beispiele, wie komplexe Systeme zu analysieren und im Modell zu synthetisieren sind. Zusätzlich werden sie von einer zweiten Lehrperson in verschiedenen Kommunikationsformen wie Bericht, Vortrag oder Poster geschult.

Die tragende Struktur, welche die verschiedenen Aspekte verknüpft und die ausgewählten Themen zusammenhält, nennt sich Physik der dynamischen Systeme oder einfach nur Systemphysik [1]. Aufbauend auf der Bilanz mengenartiger Grössen, den konstitutiven Gesetzen sowie der speziellen Rolle der Energie durchdringt die Systemphysik alle Gebiete der Naturwissenschaften, setzt neue Akzente und räumt mit historisch gewachsenen Fehlvorstellungen auf. Zudem eignet sich die Systemphysik hervorragend als Basis für eine rechnergestützte Modellbildung dynamischer Systeme.

## 1 Aviatik an der ZHAW

Die Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) führt seit Herbst 2006 den Studiengang Aviatik in ihrem Angebot. Basierend auf einer soliden Grundausbildung werden Kenntnisse in Aerodynamik, Navigation, Air Traffic Management und vielen weiteren Bereichen der Luftfahrt vermittelt. Diese Breite in der Fachausbildung wird durch die grosse Heterogenität bei den Studienanfängern zusätzlich akzentuiert. Um den unterschiedlichen Bedürfnissen und Ansprüchen gerecht zu werden, vermitteln wir die Physik teilweise problembasiert (Problem Based Learning).

Das Modul Physik und Systemwissenschaft bildet im ersten Studienjahr einen Schwerpunkt (16 von insgesamt 60 ETCS-Leistungspunkte). Die Studierenden besuchen eine Vorlesung (zwei Lektionen pro Woche), eine Modellbildungs- und Übungsveranstaltung (vier Lektionen pro Woche) sowie einen zusätzlichen Kurs in Sprache und Kommunikation (zwei Lektionen pro Woche).

Neben dem ordentlichen Physikkurs absolvieren die Studierenden zuerst eine Einführung in die systemdynamische Modellbildung und erstellen danach in Dreiergruppen je

ein komplexes Modell zur Mechanik, zu einer Flugbewegung und zu einem thermodynamischen Vorgang. Parallel dazu schreiben sie einen Fachartikel, verfassen einen wissenschaftlichen Bericht, halten einen Vortrag und nehmen an einer Postersession teil. All diese Arbeiten werden von den beteiligten Dozierenden gemeinsam betreut und beurteilt.

## 2 Physik der dynamischen Systeme

Die Systemphysik beschreibt die grundlegenden Prozesse in der Natur nach einem einheitlichen Muster und setzt auf die systemdynamische Modellbildung als strukturbildendes Paradigma. Dazu werden in jedem Gebiet zuerst die mengenartigen oder bilanzierfähigen Größen sowie die zugehörigen Potentiale identifiziert. Danach formuliert man die konstitutiven Gesetze (kapazitive, resistive oder induktive Abhängigkeiten zwischen den Mengen, ihren Strömen und den zugehörigen Potenzialen). Zum Schluss wird der Energie die Rolle der Buchhalterin zugewiesen. Dabei ergibt sich das folgende Bild:

**Tabelle 1:** Mengen und Potentiale.

Gebiet	Menge	Potenzial	Prozessleistung
Gravitation	Masse	Gravitations-	$P = \Delta\phi_G I_m$
Hydrodynamik	Volumen	Druck	$P = \Delta p I_v$
Elektrodynamik	el. Ladung	el. Potenzial	$P = UI$
Translation	Impuls	Geschwindigkeit	$P = \Delta v_x I_{px} + \Delta v_y I_{py} + \Delta v_z I_{pz}$
Rotation	Drehimpuls	Winkelgeschwind.	$P = \Delta\omega_x I_{Lx} + \Delta\omega_y I_{Ly} + \Delta\omega_z I_{Lz}$
Thermodynamik	Entropie	Temperatur	$P = \Delta T I_s$
Chemie	Stoffmenge	chemisches	$P = \Delta\mu I_n$

Stromstärken werden mit einem  $I$  plus Index bezeichnet. Änderungsraten des Inhalts kürzen wir mit einem Punkt über dem Formelzeichen ab. Kräfte bzw. Drehmomente sind als systembezogene Impuls- bzw. Drehimpulsströme definiert.

Wer mit den Bondgraphen [2] oder mit ähnlichen Methoden [3] vertraut ist, wird die Strukturähnlichkeit zwischen der Systemphysik und den andern Modellierungstechniken unschwer erkennen. Die Systemphysik geht aber noch einen Schritt weiter und entwickelt die gesamte Theorie auf der Basis der Mengenbilanz, der konstitutiven Gesetze und der klar definierten Funktion der Energie.

## 3 Vom Wasser lernen

Im historisch-klassischen Zugang zur Physik beginnt man mit der Punktmechanik und akzeptiert damit eine Unzahl von Schwierigkeiten wie die zweifache Ableitung des Ortsvektors nach der Zeit oder die Äquivalenz von träger und schwerer Masse bzw. von Feld-

stärke und Beschleunigung. Um solche Fussangeln zu umgehen führt die Systemphysik die Studierenden über die eigens dazu entwickelte Hydrodynamik in die grundlegenden Konzepte einer umfassenden Systemdynamik ein. Volumen als Menge und Druck als Potenzial sind dermassen einfache Konzepte, dass auch Fachdidaktiker den Einstieg über die Hydrodynamik empfehlen [4].

Die Hydrodynamik legt nicht nur die Basis für das umfassende Verständnis dynamischer Systeme, sie liefert auch viele Anwendungen für die Modellbildung und Simulation. Zu Beginn des Modellbildungslabors erhält jede Gruppe einen Baukasten mit Schlauchmaterial, Anschlüssen, T- und Kreuzverschraubungen, Hahnen sowie Rückschlagventilen. Nur die als Speicher dienenden PET-Flaschen sind von den Studierenden selber zu besorgen. Betrieben werden die Systeme mit Hilfe der Wasserversorgung, welche einen Überdruck von bis zu 5 bar liefert. Da PET-Flaschen auf bis zu 10 bar belastet werden dürfen, ist kaum mit Unfällen zu rechnen.

Presst man die Luftblase in einer PET-Flasche mit Hilfe des einströmenden Wassers stark zusammen und verbindet danach diese Flasche mit einer zweiten, erhält man ein dynamisches System, das den Modellierern schon einiges an Abstraktionsfähigkeit abverlangt. Bei geeigneter Wahl der Schlauchdurchmesser liegt die Strömung im Grenzgebiet zwischen laminar und turbulent.

Die suggestive Kraft der graphischen Benutzeroberflächen (Systemdiagramm) von systemdynamischen Werkzeugen wie STELLA, Powersim, Berkeley Madonna oder Vensim geleitet die Studierenden vom System zum Modell. So werden PET-Flaschen zu Reservoirs und Schläuche zu Flüssen. Auch die Rückkopplung vom Inhalt über den Druck (kapazitives Gesetz) zur Beschreibung der Zu- oder Abflüsse (resistive Gesetze) bietet keine all zu grossen Verständnisschwierigkeiten. Einzig das induktive Gesetz, welches das träge Verhalten der Flüssigkeit beim Ein- und Ausschalten beschreibt, verlangt den Studierenden einiges an Abstraktionsvermögen ab.

Zur Validierung der Modellstruktur bestimmt man das aktuelle Volumen über eine Gewichtskraftmessung [5]. Der direkte Vergleich von gemessenen und simulierten Daten erlaubt die Optimierung ausgewählter Parameter wie etwa der Verlustziffer in den Schläuchen und Armaturen.

Die Systemphysik unterscheidet klar zwischen dem zugeordnetem Energiestrom, einer reinen Buchhaltungsgrösse, und der Prozessleistung, dem eigentlichen Arbeitsvermögen pro Zeit. Beim zugeordneten Energiestrom weist man jedem Volumenstrom über den Druck einen Energiestrom zu. Die absolute Stärke des Energiestromes hängt deshalb von der Wahl des Drucknullpunktes ab. Im Gegensatz dazu besagt die Prozessleistung, die in der Hydrodynamik gleich dem Produkt aus Volumenstrom und Druckdifferenz ist, wie viel Energie pro Zeit vom Volumenstrom aufgenommen oder freigesetzt wird. Die Energiebilanz, welche die zugeordneten Energieströme mit der Änderung des Energieinhalts verknüpft, kann bezüglich jeden Speichers aufgestellt werden. Dabei ist die Vorzeichenregel der Volumenbilanz strikt zu übernehmen.

## **4 Elektrodynamik**

Die Analogie zwischen hydraulischen und elektrischen Stromkreisen ist dermassen populär, dass hier nicht weiter auf die Vorzüge einer solchen Betrachtung eingegangen

werden muss. Fehlkonzepte können sich dennoch entwickeln. So hat ein recht guter Student auf die Frage, wie die Energie von der Batterie zur Glühbirne transportiert werde, treuherzig geantwortet, dass sich die Elektronen auf dem Hinweg schneller bewegen als auf dem Rückweg. Auf ähnliche Missverständnisse stösst man mit derselben Frage im hydraulischen Kreis. Die Systemphysik verzichtet bewusst auf eine ins Detail gehende Darstellung und spricht hier einfach nur vom zugeordneten Energiestrom im Sinne einer rein buchhalterischen Betrachtung.

Elektrischen Netzwerken fehlen die echten Speicher, da sich auch die Kondensatoren wie Stromglieder verhalten. Entsprechend schwierig gestaltet sich die Modellbildung einer elektrischen Schaltung mittels systemdynamischer Werkzeuge. Deshalb muss die Schaltung vor der eigentlichen Modellierung an einem geeigneten Punkt gedanklich mit der Erde verbunden werden. Danach bricht man die Stromkreise auf, indem man den geerdeten Teil ausschneidet. So bleibt von jedem Kondensator nur noch ein Teil übrig, der als Reservoir ins Systemdiagramm übertragen werden kann. Dieses Verfahren funktioniert, solange keine Kondensatoren in Serie geschaltet sind. Bei Serieschaltung von Kondensatoren muss eine zusätzliche Strom-Strom-Kopplung eingeführt werden

Die Elektrodynamik könnte man mit der Begründung, dass sie sich für eine entsprechende Darstellung wenig eignet, aus einem auf die Systemdynamik ausgerichteten Kurs streichen. Damit würde man aber das Kind mit dem Bade ausschütten. Die Elektrodynamik kann wie alle andern Gebiete der klassischen Physik auf die drei Säulen Bilanz, konstitutive Gesetze und spezielle Rolle der Energie gestellt werden. Zudem bildet sie mit ihren Stromkreisen eine ergänzende Betrachtungsweise zur Mechanik, die in ihrer klassischen Darstellung nur Speicher kennt und ihre Ströme hinter abstrakten Begriffen wie Kraft und Drehmoment versteckt.

## 5 Bewegung und Flüssigkeitsbild

1905 hat *Albert Einstein* Raum und Zeit zu einer Einheit verschmolzen, die Energie mit der Masse gleich gesetzt und damit aus dem Impuls und der Energie-Masse einen vierdimensionalen Vektor geformt. Der Impuls, im Französischen *quantité de mouvement* genannt, sollte deshalb wie die Masse als elementare Primärgrösse direkt aus den Phänomenen gewonnen werden. Das sture Festhalten der Schulphysik am spätbarocken Konzept der Punktmechanik erinnert stark an den Sexualkundeunterricht der Fünfzigerjahre. Statt die Dinge beim Namen zu nennen, werden längst verstorbene Säulenheilige aufgerufen und Konzepte vermittelt, welche nur im Weltraum oder in der Vakuumröhre funktionieren, bei Frontalkollisionen, Vogelschlägen oder andern hochdynamischen Prozessen für das Verständnis aber kaum förderlich sind.

In der Systemphysik wird der Impuls als erfahrbare Menge direkt aus den Experimenten gewonnen. Dazu muss man dessen Vektoreigenschaft mittels eines globalen Koordinatensystems in drei skalare Mengen aufbrechen. Die träge Masse verhält sich kapazitiv, Dämpfer resistiv und Federn induktiv. Das Gravitationsfeld wirkt als Impulsquelle, die Stärken der Impulsströme bezüglich eines Systems nennt man Kräfte und die zugeordneten Energieströme heissen Leistungen der Kräfte. Die zusammen mit dem Impuls gespeicherte Energie ist die kinetische. Für die über Dämpfer und Federn umgesetzte Energie gibt es in der Punktmechanik keine brauchbare Bezeichnung.

Die Akzeptanz des systemdynamischen Zugangs hat sich beträchtlich erhöht, seit wir das Flüssigkeitsbild [6] als didaktisches Hilfsmittel einsetzen. In diesem Bild erscheinen die Körper als zylinderförmige Töpfe, welche in einem riesigen See stehen. Der Impuls wird so zur (schweren) Flüssigkeit, die Masse zum Querschnitt eines Topfs und die Füllhöhe zur Geschwindigkeit. Der See repräsentiert die Erde, mit welcher die Körper unter Energieaufwand Impuls austauschen. Das Flüssigkeitsbild beinhaltet die Impuls- sowie die Energiebilanz und liefert einen direkten Zugang zum mechanischen Energieumsatz: zugeordneter Energiestrom, Prozessleistung und kinetische Energie können selbsterklärend dem Flüssigkeitsbild entnommen werden.

Wer die eindimensionale Mechanik mit Hilfe des Flüssigkeitsbildes begriffen hat, dem gelingt die Übersetzung ins Systemdiagramm ohne grossen Aufwand. Einzig die Kinematik, der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Ort, muss noch separat erarbeitet werden. Ein systemdynamisches Modell zur Translation besteht deshalb immer aus einer Bilanzenebene, einem Kinematikteil sowie einer Energieebene. Der Kinematikteil integriert die Geschwindigkeit, welche aus dem Impuls durch Division mit der Masse gebildet wird, über die Zeit zur Position. Bewegt sich ein Körper im Raum, sind drei Impulsbilanzen und drei kinematische Integratoren zu formulieren, die von einer einzigen Energiebilanz überdacht werden.

## 6 Die Eleganz der Pirouette

Die klassische Formulierung des Drehimpulses verknüpft den Impuls eines Körpers mit einem fixen Ort im kastenförmigen Weltraum. Um aus dieser nichtlokalen, stark geometrisierten Grösse eine bilanzierfähige Menge zu bilden, muss einiges umgestellt werden. Vorerst ist der Drehimpuls wie der Impuls mittels eines raumfesten Koordinatensystems in drei skalare Mengen aufzuteilen. Danach sollte man sich vorerst auf eine der drei Komponenten konzentrieren.

Speicher sind in Form von rotierenden Körpern einfach zu identifizieren. Etwas schwieriger verhält es sich mit den Strömen. Im Gegensatz zum Impuls, dessen Transport lokal durch die Navier-Stokes-Gleichung beschrieben wird, kann für den Drehimpuls keine äquivalente Formulierung gefunden werden. Bezogen auf ganze Bauteile sieht die Sache aber viel besser aus: Drehimpuls, der in einer Antriebswelle in oder gegen seine Bezugsrichtung transportiert wird, belastet diese auf Torsion; quer fliessender Drehimpuls erzeugt Biegung. Das Hebelgesetz, welches einer Kraft ein Drehmoment zuweist, ordnet dem quer zu seiner Bezugsrichtung fliessenden Impulsstrom eine Drehimpulsquelle zu.

Die Dynamik der Rotation lässt sich ebenfalls ins Flüssigkeitsbild übersetzen. Dieses Bild dient wiederum als Brücke zwischen realem System und systemdynamischem Modell. Nun darf sich auch der Querschnitt eines Topfes, welcher für das Massenträgheitsmoment steht, ändern. Damit wird erklärt, wieso die Eiskunstläuferin oder der Turmspringer ihre Drehzahl ohne äussere Einwirkung willkürlich verändern können. Solange man sich auf ebene Bewegungen beschränkt, treten als zusätzliche Schwierigkeit der Bahndrehimpuls und das Hebelgesetz auf. Das erste Problem führt in der Regel zu neuen Töpfen (Zustandsgrössen), das zweite muss mittels einer Strom-Strom-Kopplung abgebildet werden.

Die Systemphysik ermöglicht eine zwangslose Erweiterung der Drehmechanik auf alle drei Freiheitsgrade. Weil die Umrechnung vom Drehimpulsinhalt auf die Winkelgeschwindigkeit und die nachfolgende Integration zur eigentlichen Drehbewegung mathematisch nicht trivial sind, eignen sich dafür die systemdynamischen Werkzeuge weniger gut. Doch wer den modularen Aufbau der Systemphysik begriffen hat, sollte derart komplexe Probleme auch in einer höheren Sprache wie etwa Modelica [7] formulieren können.

## 7 Dickbrettbohrerfach Thermodynamik

Die Thermodynamik unterscheidet sich in zwei wesentlichen Punkten von den bisher besprochenen Zweigen der Physik. Erstens nimmt die bilanzierfähige Basismenge, die Entropie, in allen realen Prozessen zu und zweitens kennt die Thermodynamik keine elementaren Speicher. Das erste Problem ist lösbar, indem man zuerst nur die reversible Prozessführung modelliert und nachträglich um die dissipativen Einflüsse erweitert. Das zweite Problem lässt sich mit Hilfe des Carnotors lösen. Der Carnotor ist eine virtuelle Maschine, die aus einem ideal isolierten Zylinder besteht, der mittels eines frei verschiebbaren Kolbens in zwei Kammern unterteilt wird. In der einen Kammer befindet sich der zu modellierende Stoff, in der anderen eine ideale Flüssigkeit (reibungsfrei, inkompressibel). Der Carnotor weist zwei Zugänge (Ports) auf, einen hydraulischen und einen thermischen, an denen Pumpen, weitere Speicher und Isolatoren angeschlossen werden können. Die vier Grundprozesse der Thermodynamik werden dann wie folgt abgebildet:

**Tabelle 2:** Thermische Prozesse.

Prozess	thermischer Port	hydraulischer Port
<b>isochor</b>	Wärmepumpe	geschlossen
<b>isobar</b>	Wärmepumpe	kurz geschlossen
<b>isentrop</b>	geschlossen	Hydraulikpumpe
<b>isotherm</b>	kurz geschlossen	Hydraulikpumpe

In der systemdynamischen Modellierung wird der Carnotor durch zwei Töpfe (Reservoir) mit je einer Zuleitung (Flow) dargestellt. Der eine Topf steht für die Entropiebilanz und der andere für die Volumenbilanz ab. Mit zwei stoffspezifischen Gesetzen sind dann den beiden Mengen Entropie und Volumen die Potenziale Druck und Temperatur zuzuordnen. Wie in allen Zweigen der Physik bildet die Energiebilanz mit Wärme, Arbeit und innerer Energie eine zweite Ebene. Optional können noch die Enthalpie und die freie Energie berechnet werden.

Im zweiten Teil des zweiten Semesters haben sich alle Gruppen mit je einem System zur Thermodynamik beschäftigt und ihre Resultate in Form eines Posters präsentiert. Die dabei erzielten Resultate haben keinen Vergleich zu scheuen. Vielen Gruppen ist es gut gelungen, sich in wenigen Wochen in die Thermodynamik einzuarbeiten und die Theorie

auf Prozesse anzuwenden, wie sie in Verbrennungsmotoren und Strahltriebwerken ablaufen.

## 8 Schlussbetrachtung

Die Einführung der Fachhochschulen in der Schweiz Ende der neunziger Jahre sowie die nachfolgende Bologna-Reform haben die Tendenz, die Studierenden mit Kurzfutter zu versorgen, weiter verstärkt. In einem dermassen auf Cash and Carry ausgerichteten Lehrbetrieb sind Veranstaltungen wie die hier vorgestellte von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Aufbauend auf einem von Grund auf neu strukturierten Lehrgang lernen die Studierenden, wie dynamische Systeme zu modellieren sind. Dass sie sich dabei noch Kenntnisse aneignen, die als Basis für objektorientierte Modellbildungssprachen wie Modelica oder VHDL-AMS dienen, hilft ihnen in ihrem späteren Beruf, sich in einem komplexen Umfeld zu behaupten.

## 9 Hinweise und Literatur

- [1] [www.pegaswiss.ch](http://www.pegaswiss.ch)
- [2] *D. Karnopp, D. Margolis, R. Rosenberg: System Dynamics, A Unified Approach.* John Wiley & Sons, 1990.
- [3] *J. Shearer, A. Murphy, H. Richardson: Introduction to System Dynamics.* Addison-Wesley, 1967
- [4] *J.P. Meyn: Einführung in die Hydromechanik im fachübergreifenden Kontext. Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 1/5 (2006) S. 28-34.*
- [5] z.B. Beispiel mit LabPro von Vernier ([www.vernier.com](http://www.vernier.com))
- [6] *W. Maurer: Der Impuls im Flüssigkeitsbild. Praxis der Naturwissenschaften Physik 4/45 (1996) S. 35-40.*
- [7] [www.modelica.org](http://www.modelica.org)

# Nutationen schwerer symmetrischer Kreisel

Rüdiger Hohmann  
hohmann@isg.cs.uni-magdeburg.de  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, ISG  
39016 Magdeburg, PSF 4120

## Kurzfassung

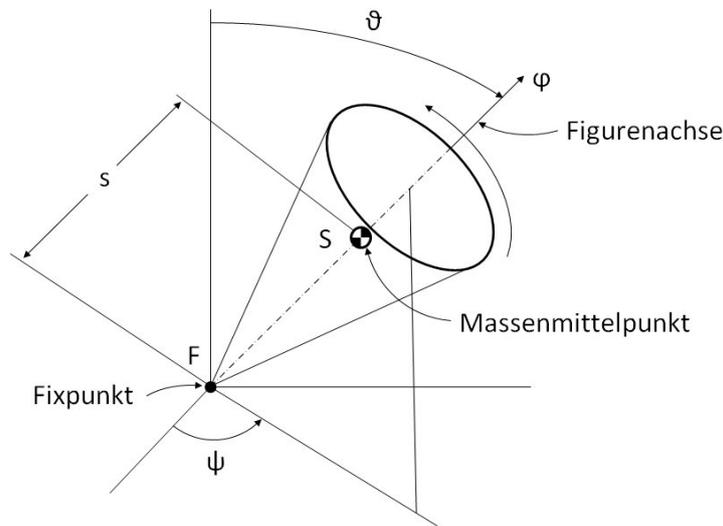
Ein schwerer symmetrischer Kreisel wird abweichend von der Winkelgeschwindigkeit der Präzession  $\omega_p$  und der hier gleichmäßig auf einem Kegel umlaufenden Figurenachse, durch einen Anfangswert  $\dot{\psi}(0) \neq \omega_p$ , d. h. nach dem Loslassen ohne Stoß, zu Nutationen angeregt. Die Bahnkurven können Wellen-, Spitzen- oder Schleifenbahnen sein. Die Simulation erfolgt auf der Basis von drei Differentialgleichungen der Euler-Winkel  $\psi \vartheta \varphi$  für raumfeste Koordinaten. Man erhält sie direkt mittels der Lagrange-Gleichungen zweiter Art und ebenso aus den bekannten Euler-Gleichungen des körperfesten Systems. Die quadratische Definitionsgleichung der Präzessionen  $\omega_{p1} \omega_{p2}$  folgt aus der Bewegungsgleichung des Neigungswinkel  $\vartheta$ . Diese beiden Winkelgeschwindigkeiten definieren Bereiche für charakteristische Verläufe der Nutationen. Simulationssystem ist das block- und gleichungsorientierte ACSL.

## 1 Einleitung

Die Bewegungsgleichungen des schweren symmetrischen Kreisels sind mittels elliptischer Integrale analytisch vollständig gelöst. Die numerische Integration und Parameterstudien der Bewegungsgleichungen sind die Methoden der Simulation.

Am Anfang steht die Herleitung der Bewegungsgleichungen für ein raumfestes System mittels der Lagrange-Gleichungen zweiter Art und ebenso aus den bekannten Euler-Gleichungen des körperfesten Systems [1, 2]. Wenn das für den Fixpunkt F gültige Trägheitsellipsoid rotationssymmetrisch ist (Trägheitsmomente  $B = C$ ) und der Massenmittelpunkt S auf der Figurenachse liegt, so besteht Symmetrie (Bild 1).

Aus der Bewegungsgleichung für den Neigungswinkel  $\vartheta$  lassen sich die beiden möglichen Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_{p1} \omega_{p2}$  der Präzession des Kreisels bestimmen, der mit  $\omega_0$  und dem zugehörigen Trägheitsmoment  $A$  um seine Figurenachse rotiert. Diese Geschwindigkeiten  $\omega_{p1} \omega_{p2}$  bilden die Grenzen für charakteristische Verläufe der Nutationen. Bei vorgegebenen  $\omega_0$  und  $\omega_p$  lässt sich der zugehörige Neigungswinkel  $\vartheta_0$  auch über das Momentengleichgewicht um den Fixpunkt F ermitteln. Eine weitere Herleitung der Präzessionen erlauben die Drehimpulse des Systems. Alle drei Zugänge führen auf eine quadratische Definitionsgleichung.



**Bild 1:** Schwerer symmetrischer Kreisel in Kegelgestalt.

## 2 Bewegungsgleichungen

Die Lagrange-Funktion des Kreisels  $L = T - U$ , Differenz von kinetischer und potentieller Energie, besitzt drei verallgemeinerte Koordinaten für die Winkel  $q_1 = \varphi, q_2 = \vartheta, q_3 = \psi$  sowie die Parameter  $A$  als Trägheitsmoment um die Figurenachse mit  $\omega_F = \dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \vartheta$ ,  $B$  das Trägheitsmoment um den Fixpunkt  $F$ ,  $m$  die Masse des Kreisels und  $s$  den Abstand zwischen Fixpunkt und Massenmittelpunkt.

Kinetische Energie  $T$  und potentielle Energie  $U$  :

$$T = \frac{B}{2} (\dot{\psi}^2 \sin^2 \vartheta + \dot{\vartheta}^2) + \frac{A}{2} (\dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \vartheta)^2, \quad U = mgs \cos \vartheta \quad (1)$$

Lagrange-Funktion in verallgemeinerten Koordinaten:

$$L = \frac{B}{2} (\dot{q}_3^2 \sin^2 q_2 + \dot{q}_2^2) + \frac{A}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_3 \cos q_2)^2 - mgs \cos q_2 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

Die Lagrange-Gleichung zweiter Art (3), gültig für konservative Systeme, ist für die drei verallgemeinerten Koordinaten  $q_i$  auf die Lagrange-Funktion (2) anzuwenden.

Bewegungsgleichungen [3] für  $0 < \vartheta < \pi / 2$  und Anfangswerten bei Präzession:

$$\ddot{\varphi} = \dot{\psi} \dot{\mathcal{G}} \sin \mathcal{G} - \ddot{\psi} \cos \mathcal{G}, \quad \varphi(0) = 0, \dot{\varphi}(0) = \omega_0 \quad (4)$$

$$\ddot{\mathcal{G}} = \frac{(B-A)\dot{\psi}^2 \sin \mathcal{G} \cos \mathcal{G} - A\dot{\varphi}\dot{\psi} \sin \mathcal{G} + mgs \sin \mathcal{G}}{B}, \quad \mathcal{G}(0) = \mathcal{G}_0, \dot{\mathcal{G}}(0) = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{-2B\dot{\mathcal{G}}\dot{\psi} \cos \mathcal{G} + A(\dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \mathcal{G})\dot{\mathcal{G}}}{B \sin \mathcal{G}}, \quad \psi(0) = 0, \dot{\psi}(0) = \omega_p \quad (6)$$

Mit der Bezeichnungweise aus [1, 2] für den Winkelgeschwindigkeitsvektor  $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ , für den Drehimpulsvektor  $\mathbf{L} = (A\omega_x, B\omega_y, B\omega_z)$ , für den Ortsvektor des Massenmittelpunktes  $\mathbf{s} = (s, 0, 0)$  und dem von der Schwerkraft ausgeübten Drehmoment  $\mathbf{M} = (0, mgs \sin \mathcal{G} \cos \varphi, -mgs \sin \mathcal{G} \sin \varphi)$  lauten die sechs Euler-Gleichungen für das körperfeste Hauptachsensystem mit dem Ursprung im Fixpunkt F bekanntlich

$$\begin{aligned} A\dot{\omega}_x &= 0, \\ B\dot{\omega}_y + (A-B)\omega_z\omega_x &= mgs \sin \mathcal{G} \cos \varphi, \\ B\dot{\omega}_z - (A-B)\omega_x\omega_y &= -mgs \sin \mathcal{G} \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \mathcal{G} &= \omega_x, \\ \dot{\mathcal{G}} \cos \varphi + \dot{\psi} \sin \mathcal{G} \sin \varphi &= \omega_y, \\ -\dot{\mathcal{G}} \sin \varphi + \dot{\psi} \sin \mathcal{G} \cos \varphi &= \omega_z. \end{aligned} \quad (7)$$

Das Substituieren der drei Komponenten des Vektors der Winkelgeschwindigkeit  $\boldsymbol{\omega}$  und ihrer Ableitungen in den oberen Bewegungsgleichungen liefert sofort (4). Multipliziert man die zweite Dgl. mit  $\cos \varphi$ , die dritte mit  $\sin \varphi$  und subtrahiert beide voneinander, so folgt (5), nach Vertauschen dieser Faktoren und Addition schließlich (6).

Eine Alternative wäre die Simulation mittels des Systems (7) von Dgl. 1. Ordnung, Basis der analytischen Behandlung in [1, 2]. Sie würde neben den Euler-Winkeln auch die Komponenten des Vektors der Winkelgeschwindigkeit  $\boldsymbol{\omega}$  liefern. Da das Auflösen der letzten beiden Dgl. nach  $\dot{\mathcal{G}}$  bzw.  $\dot{\psi}$  jeweils zu  $\cos \varphi$  im Nenner führt und so Division durch Null eintritt, bietet sich eine Integration in impliziter Form mittels DASSL-Code an. Die Anfangswerte des Dgl.-Systems sind

$$\varphi(0) = 0, \mathcal{G}(0) = \mathcal{G}_0, \psi(0) = 0, \omega_x(0) = \omega_0 + \dot{\psi}_0 \cos \mathcal{G}_0, \omega_y(0) = 0, \omega_z(0) = \dot{\psi}_0 \sin \mathcal{G}_0. \quad (8)$$

Die ermittelten Lösungen waren jedoch numerisch instabil. Besonders deutlich ist dies am Verlauf  $\mathcal{G}(\psi)$  für  $\dot{\psi}_0 = \omega_{p1}$  und  $\dot{\psi}_0 = \omega_{p2}$  ablesbar, wo  $\mathcal{G} = \mathcal{G}_0$  bleiben sollte. Deshalb werden im folgenden die numerisch stabilen Dgl. (4)–(6) für die Simulation benutzt.

### 3 Präzession

Die Charakteristika der Präzession sind:  $\vartheta = \text{const.}$ ,  $\dot{\psi} = \text{const.}$  und  $\dot{\phi} = \text{const.}$ , so dass  $\ddot{\vartheta} = 0$  gilt und aus (4) die quadratische Gleichung (9) für  $\omega_p = \dot{\psi}$ , mit  $\dot{\phi} = \omega_0$  und  $\vartheta = \vartheta_0$  folgt.

$$(B - A)\omega_p^2 \cos \vartheta_0 - A\omega_0\omega_p + mgs = 0 \quad (9)$$

Sie besitzt für einen Drall  $A\omega_0 \geq 2\sqrt{mgs(B - A)\cos \vartheta_0}$  die reellen Lösungen

$$\omega_{p1,2} = \frac{A\omega_0 \mp \sqrt{A^2\omega_0^2 - 4mgs(B - A)\cos \vartheta_0}}{2(B - A)\cos \vartheta_0} \quad (10)$$

Eine Doppelwurzel liegt für  $A^2\omega_0^{*2} - 4mgs(B - A)\cos \vartheta_0 = 0$  vor. Der kräftefreie Kreisel ( $s = 0$ ) besitzt nur eine Präzessionsgeschwindigkeit  $\omega_p \neq 0$  für das positive Vorzeichen, d. h.  $\omega_{p1} = 0$  und für  $\omega_0^*$  gilt

$$\omega_p = \frac{A\omega_0}{(B - A)\cos \vartheta_0}, \quad \omega_0^* = \frac{2}{A}\sqrt{mgs(B - A)\cos \vartheta_0}. \quad (11)$$

Ausgehend von den Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_0$  und  $\omega_p$  des Kreisels während der Präzession, lässt sich der zugehörige Neigungswinkel  $\vartheta_0$  über das Gleichgewicht von Schwere-, Zentrifugal- und Coriolismoment um den Fixpunkt F ermitteln. Es genügt, als Element von Rotationskörpern einen mit Masse belegten Kreis zu betrachten, der im Abstand  $s$  um die Figurenachse rotiert.

Während das Schwere- und das Zentrifugalmoment  $M_s$   $M_z$  nach außen wirken, versucht das Coriolismoment  $M_c$  den Kreisel nach innen zu drehen. Die Corioliskräfte der oberen Kreishälfte zeigen nach innen, die der unteren Hälfte nach außen. Ein Gleichgewicht kann sich einstellen, wenn Kreisel und Präzession die gleiche Drehrichtung haben, wie z. B. die Linksdrehung in Bild 1. Die quadratische Gleichung (9) folgt wiederum aus der Summe der Momente (12):

$$M_s = mgs \sin \vartheta_0, \quad M_z = (B - A)\omega_p^2 \sin \vartheta_0 \cos \vartheta_0 \quad \text{und} \quad M_c = A\omega_0\omega_p \sin \vartheta_0. \quad (12)$$

Das Zentrifugal- und Coriolismoment erhält man durch Integration über den Kreis mit dem Winkel als Integrationsvariable; Symmetrien verbessern die Übersichtlichkeit. Das Schweremoment des Massenmittelpunktes ist von Bild 1 ablesbar.

Liegen der Vektor der Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  und die Figurenachse in einer Ebene, so zeigt in der Präzession der Vektor  $|\mathbf{dL}| = |\mathbf{M}_s| dt$  infolge des Schweremoments

$|\mathbf{M}_s| = mgs \sin \mathcal{G}$  senkrecht in die Ebene hinein (Bild 1), d. h. der Kreisel weicht vor dem Moment  $\mathbf{M}_s$  horizontal nach hinten aus [4]. Die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  erhält man mittels der Horizontalkomponente  $\mathbf{L}_H$  des Drehimpulses

$$|\mathbf{L}_H| = A(\dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \mathcal{G}) \sin \mathcal{G} - B \dot{\psi} \sin \mathcal{G} \cos \mathcal{G} \quad (13)$$

aus dem Verhältnis  $d\psi = |d\mathbf{L}|/|\mathbf{L}_H|$ . Für die Parameter  $\dot{\phi} = \omega_0$ ,  $\mathcal{G} = \mathcal{G}_0$ ,  $\dot{\psi} = \omega_p$  folgt damit erneut (9) zur Bestimmung der Präzessionsgeschwindigkeiten. Die Bedingung  $|\mathbf{L}_H| = 0$  von (13) liefert die Winkelgeschwindigkeit (11) der Präzession des kräftefreien Kreisels.

## 4 Simulationen

Simulationssystem ist das block- und gleichungsorientierte ACSL. Die Lösungen der Parameterstudie werden als Postscript-Dateien erzeugt, in CorelDraw importiert und als Vektorgrafiken im Format Windows-Metadatei (WMF) exportiert. Integrationsmethode ist das schrittweitengesteuerte Verfahren Runge-Kutta-Fehlberg 5/6.

Dargestellt werden die Abweichungen  $\varepsilon(\psi) = \mathcal{G}(\psi) - \mathcal{G}_0$  des Neigungswinkels  $\mathcal{G}(t)$  vom Neigungswinkel  $\mathcal{G}_0$  des Präzessionskegels für Anfangswerte  $\dot{\psi}(t=0) = \dot{\psi}_0$ . Wir erhalten für  $\dot{\psi}_0 = 0$  spitze (Bild 2), für  $0 < \dot{\psi}_0 < \omega_{p1}$  wellige Nutationen  $\varepsilon(t) \geq 0$  (Bild 3), im Falle  $\omega_{p1} < \dot{\psi}_0 < \omega_{p2}$  Schleifenbahnen  $\varepsilon(t) \leq 0$  (Bild 5) und für  $\dot{\psi}_0 > \omega_{p2}$  wiederum wellige Nutationsbögen  $\varepsilon(t) \geq 0$  (Bild 7).

Die folgenden Parameter haben Werte aus [2] und gelten für einen kegelförmigen Kreisel von Höhe und Radius  $H = R = 20 \text{ cm}$ :

$$\frac{A}{B} = 0,4, \quad \frac{mgs}{B} = 49,05 \text{ s}^{-2}, \quad \mathcal{G}_0 = \frac{\pi}{4} \quad \text{und} \quad \omega_0 = 55,0 \text{ s}^{-1}. \quad \text{Diese Größen sind zunächst in}$$

Glg. (10) einzuführen:

$$\omega_{p1,2} = \frac{\frac{A}{B} \omega_0 \mp \sqrt{\left(\frac{A}{B}\right)^2 \omega_0^2 - 4 \frac{mgs}{B} \left(1 - \frac{A}{B}\right) \cos \mathcal{G}_0}}{2 \left(1 - \frac{A}{B}\right) \cos \mathcal{G}_0} \quad (14)$$

Für die beiden Präzessionen folgen Winkelgeschwindigkeiten von  $\omega_{p1} = 2,335 \text{ s}^{-1}$  und  $\omega_{p2} = 49,52 \text{ s}^{-1}$ . Die Winkelgeschwindigkeit der Doppelwurzel beträgt  $\omega_0^* = 22,81 \text{ s}^{-1}$ .

Um die Trägheitsmomente  $A$  und  $B$  des Kegels zu ermitteln, kann man mit einem gleichmäßig durch Masse belegten Kreisring beginnen, geht dann zur Kreisscheibe über, um schließlich den „Stapel“ infinitesimal dünner Scheiben mit linear von der Höhe abhängigen Radien zum Kegel zu integrieren. Das entspricht dem Dreifachintegral über die unabhängigen Variablen Winkel  $\varphi$ , Radius  $r$  und Höhe  $h$ .

$$A = \frac{3}{10} mR^2, \quad B = \frac{3}{20} m(R^2 + 4H^2) \quad (15)$$

Für das Verhältnis beider Trägheitsmomente gilt dann

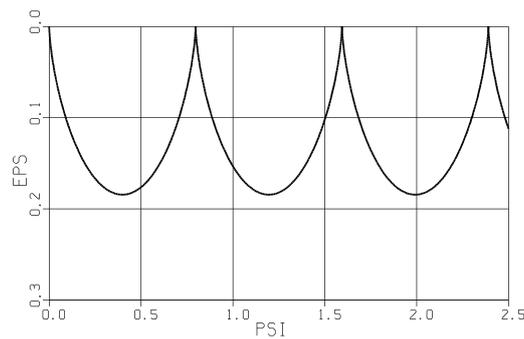
$$\frac{B}{A} = \frac{1}{2} + 2 \frac{H^2}{R^2}, \quad (16)$$

so dass bei Gleichheit  $R = H$ , unabhängig von der Dichte, der Wert  $A/B = 0,4$  folgt. Der Massenmittelpunkt befindet sich bei  $s = 3/4H$  und das Verhältnis

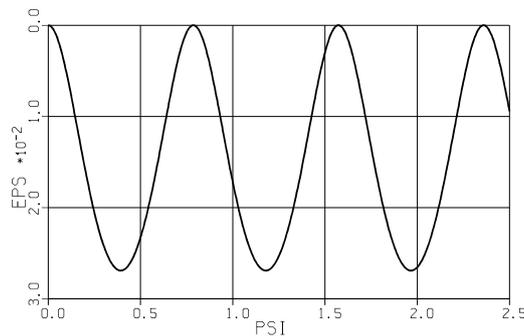
$$\frac{mgs}{B} = \frac{5gH}{R^2 + 4H^2} \quad (17)$$

nimmt für  $R = H = 0.2 \text{ m}$  den obigen Zahlenwert von  $g/R = 49,05 \text{ s}^{-2}$  an.

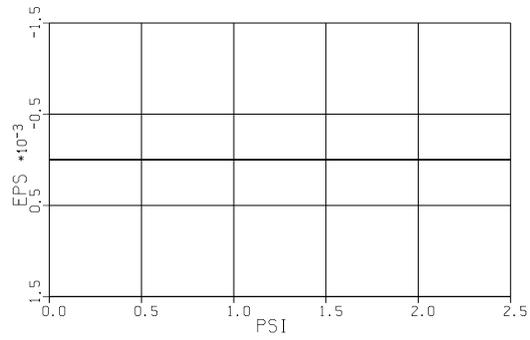
Auf den folgenden Bildern sind charakteristische Funktionen  $\varepsilon = \varepsilon(\psi)$  dargestellt:



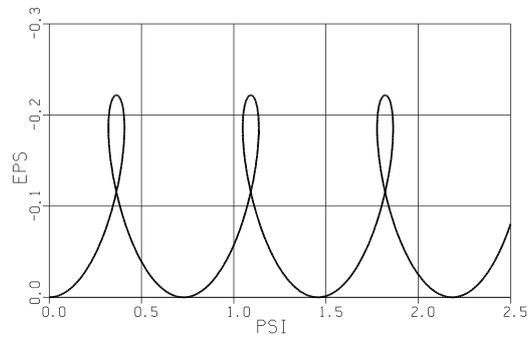
**Bild 2:** Mit Spitzen  $\dot{\psi}_0 = 0,0$ .



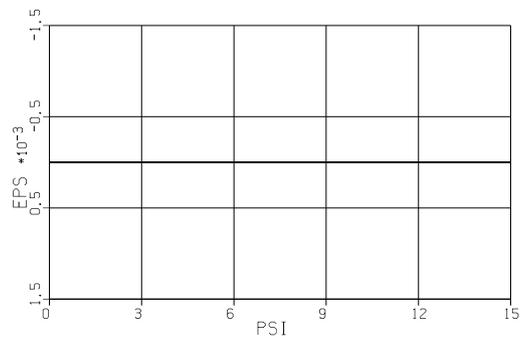
**Bild 3:** Mit Wellen  $\dot{\psi}_0 = 2,0 \text{ s}^{-1}$ .



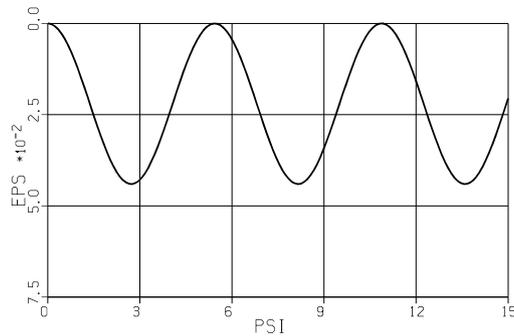
**Bild 4:** Präzession  $\dot{\psi}_0 = \omega_{p1} = 2,33466 \text{ s}^{-1}$ .



**Bild 5:** Mit Schleifen  $\dot{\psi}_0 = 5,0 \text{ s}^{-1}$ .



**Bild 6:** Präzession  $\dot{\psi}_0 = \omega_{p2} = 49,5198 \text{ s}^{-1}$ .



**Bild 7:** Mit Wellen  $\dot{\psi}_0 = 55,0 s^{-1}$ .

Die Bilder 4 und 6 der beiden Präzessionen zeigen für die berechneten  $\omega_{p1,2}$  keine Abweichungen  $\varepsilon(\psi) = \mathcal{G}(\psi) - \mathcal{G}_0$  des Neigungswinkels  $\mathcal{G}(t)$  vom Anfangswinkel  $\mathcal{G}_0$  in der gewählten Darstellungsgenauigkeit von  $1E-3$  pro Einheit. Die Präzessionen bilden einen Meridian, wenn man die Bewegung der Figurenachse auf die Oberfläche einer Kugel mit dem Mittelpunkt im Fixpunkt F abbildet. Beim aufrechten Kreisel genügt dafür die obere Kugelhälfte. Den Grenzfall des schnelllaufenden Kreisels hätte man für  $\omega_0 \gg \omega_0^*$  [5]. Bei sehr schnell laufenden Kreiseln liegen die begrenzenden Breitenkreise der Nutationen um so enger beieinander, je größer die Eigendrehung des Kreisels ist. Man hat sie deshalb als pseudoreguläre Präzession bezeichnet, im Unterschied zur regulären Präzession mit ganz bestimmten Anfangsbedingungen  $\mathcal{G}_0$  und  $\dot{\psi}_0$ .

Ein Geschwindigkeitssprung  $\Delta\dot{\psi} = \dot{\psi}_1 - \omega_p$  zur Zeit  $t = t_1$  als Anstoß für Nutationen aus der Präzession heraus, erfordert einen Drehstoß  $\hat{M} = J(\mathcal{G}_0)\Delta\dot{\psi}$  um die Vertikale [6]. Das Trägheitsmoment  $J(\mathcal{G})$  kann für Neigungswinkel  $0 < \mathcal{G} < \pi/2$  Werte  $A < J(\mathcal{G}) < B$  annehmen:

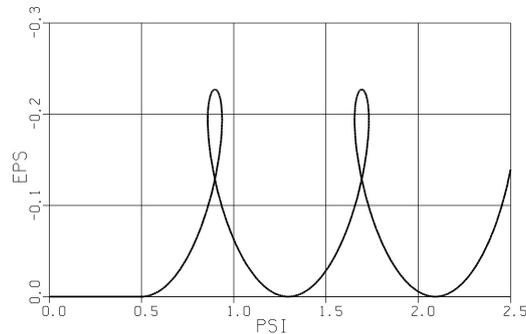
$$J(\mathcal{G}) = (B - A)\sin^2 \mathcal{G} + A \quad (18)$$

Integration des Terms  $\frac{\hat{M}}{J(\mathcal{G}_0)} \delta(t - t_1)$  in (6), (4) führt zur Heaviside-Funktion  $\theta(t - t_1)$ :

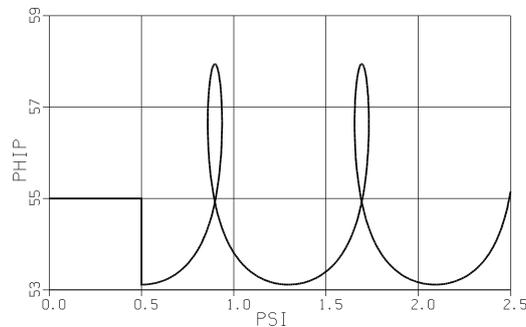
$$\dot{\psi} = \int_0^t f(t) dt + \omega_p + \Delta\dot{\psi}\theta(t - t_1), \text{ mit } f(t) = \frac{-2B\dot{\mathcal{G}}\dot{\psi}\cos\mathcal{G} + A(\dot{\phi} + \dot{\psi}\cos\mathcal{G})\dot{\mathcal{G}}}{B\sin\mathcal{G}} \quad (19)$$

$$\dot{\phi} = \int_0^t (\dot{\psi}\dot{\mathcal{G}}\sin\mathcal{G} - f(t)\cos\mathcal{G}) dt + \omega_0 - \Delta\dot{\psi}\cos\mathcal{G}_0\theta(t - t_1) \quad (20)$$

Ausgehend von der langsamen Präzession  $\dot{\psi}_0 = \omega_{p1} = 2,33466 s^{-1}$  und dem Sprung  $\Delta\dot{\psi} = 2,66543 s^{-1}$  nach  $\psi_1(t_1) \geq 0,5$  (Zustandsereignis), resultiert als Wert  $\dot{\psi}_1 = 5,0 s^{-1}$ , womit wiederum die Schleifenbahn von Bild 5 entstehen sollte (Bild 8).



**Bild 8:** Mit Schleifen  $\Delta\dot{\psi} = 2,66543 \text{ s}^{-1}$ .



**Bild 9:** Sprung  $\Delta\dot{\phi} = -\Delta\dot{\psi} \cos\vartheta_0$ .

## 5 Schlussbetrachtung

Der schwere symmetrische Kreisel lässt sich als Anfangswertaufgabe auch vollständig analytisch behandeln [1, 5], was auf elliptische Integrale führt. Basis sind die Dgln. (7) im körperfesten System, die numerisch jedoch nur implizit lösbar sind. In [2] werden kleine Nutationsbewegungen untersucht. Dadurch ist es möglich, die Zeitfunktionen der Euler-Winkel durch elementare, einfach zu übersehende Ausdrücke aus Sinus-, Cosinus- und zeitlinearen Funktionen zu beschreiben. Für die Simulation sind die numerisch stabilen Bewegungsgleichungen (4)-(6) in raumfesten Koordinaten besser geeignet.

Aus der Präzession heraus löst ein scharf konzentrierter Drehstoß (Deltafunktion) um die Vertikale, der  $\omega_p$  sprunghaft um  $\Delta\dot{\psi}$  ändert, ebenfalls Nutationen aus. Es springt jedoch auch  $\dot{\phi}$  (Bild 9), so dass die wohldefinierten Anfangswerte nicht mehr bestehen.

## 6 Literatur

- [1] *Grammel, R.:* Der Kreisel, Seine Theorie und seine Anwendungen. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag, 1950.

- [2] *Rüdiger, D. und G. Kämmerl*: Schwere symmetrische Kreisel kleiner Nutation. Archive of Applied Mechanics, Volume 32, Number 6 (2004), S. 437-442.
- [3] *Speckhart, W. and L. Green*: A Guide to Using CSMP – The Continuous System Modeling Program. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1976.
- [4] *Recknagel, A.*: PHYSIK · Mechanik. Berlin: VEB Verlag Technik, 1979.
- [5] *Magnus, K.*: KREISEL Theorie und Anwendungen. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1971.
- [6] *Joos, G.*: Lehrbuch der Theoretischen Physik, 10. Auflage. Leipzig: Akademische Verlagsanstalt Geest & Portig, 1959.

# Vergleich zweier Fahrplankonzepte mit Hilfe einer Betriebssimulation

Doris Tuna

doris.tuna@tuwien.ac.at

Institut für Verkehrswissenschaften / TU Wien / Forschungsbereich für Eisenbahnwesen,  
Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

TU-Wien / Institut für Verkehrswissenschaften, Karlsplatz 13 / E2302, 1040 Wien

Andreas Schöbel

andreas.schoebel@tuwien.ac.at

Institut für Verkehrswissenschaften / TU Wien / Forschungsbereich für Eisenbahnwesen,  
Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

TU-Wien / Institut für Verkehrswissenschaften, Karlsplatz 13 / E2302, 1040 Wien

Dietmar Zierl / Gerhard Besau

dietmar.zierl@bau.oebb.at / gerhard.besau@bau.oebb.at

ÖBB Infrastruktur Bau AG / Vivenotgasse 10, 1120 Wien

## Kurzfassung

Die Kapazität von Hauptbahnhöfen hängt in erster Linie von der Anzahl der Bahnsteigkanten, der Anzahl von Gleisen der freien Strecke, der Anzahl von Weichenverbindungen und der Mindestzugfolgezeit unmittelbar im Bahnhofsbereich ab. Um die Auswirkungen dieser Parameter zu untersuchen, ist es sinnvoll ein Simulationsprogramm zu verwenden, welches den Planfall sowie diverse Verspätungsfälle des Betriebsprogramms prüft.

Insbesondere beschäftigt sich diese Arbeit mit der Untersuchung zweier verschiedener Fahrplankonzepte und deren Durchführung auf zwei verschiedenen Infrastrukturen im selben Bahnhof. Die Betriebssimulation soll Aufschluss darüber geben, welche Gleisbelegungen und Dispositionsoptionen notwendig sind um die beiden Fahrplangebote sowohl im Planfall als auch im Verspätungsfall abwickeln zu können.

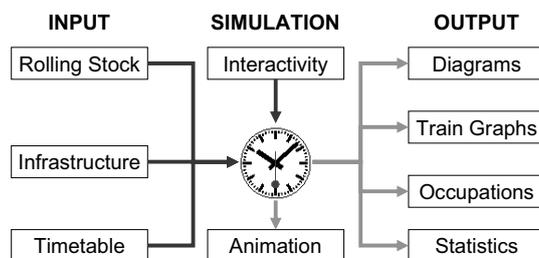
## 1 Einleitung

Der Grund dieser Arbeit liegt im Umbau des Hauptbahnhofs Salzburg, der bis jetzt als Doppelkopfbahnhof ausgeführt war und als Grenzbahnhof zwischen Bayern und Österreich funktionierte. Diese Gleiskonfiguration basiert im Wesentlichen auf dem Umbau aus den Jahren 1906 bis 1909. Aufgrund des Grenzbahnhofcharakters besteht eine Mittelinsele, die aus heutiger Sicht den Fahrgastwechsel erheblich beeinflusst. Auch die Tatsache dass ein großer Prozentsatz der ankommenden Züge in Salzburg stürzen muss, begünstigte die Entscheidung den Hauptbahnhof Salzburg in einen Durchgangsbahnhof umzubauen, um die Achse Paris – Straßburg – Stuttgart – Wien – Bratislava (TEN Axis No. 17) innerhalb des Transeuropäischen Netzwerks zu optimieren.

Somit steht die ÖBB-Infrastruktur Bau AG vor der Aufgabe, den bestehenden Hauptbahnhof in Salzburg den künftigen verkehrlichen und betrieblichen Anforderungen anzupassen. Allerdings muss angemerkt werden, dass dieser Umbau sich nicht nur auf die Gleisanlagen sondern auch auf Teile der vorhandenen, denkmalgeschützten Hochbauten bezieht. Im Laufe der Machbarkeitsstudie wurden zwei Gleiskonzepte entwickelt, die sich vor allem in der Ausbildung des Westkopfs – Richtung Freilassing unterscheiden. Um die beiden Fahrplanangebote und Infrastrukturkonzepte bezüglich ihrer Funktionalität zu beurteilen, wurde eine Mehrfachsimulation des Eisenbahnbetriebes mit Hilfe des Simulationsprogramms OpenTrack als zweckmäßiges Instrument gewählt.

## 2 Arbeitsweise, Methodik

Die Simulation wird mit Hilfe des Programms OpenTrack [OpenTrack Railway Technology, Ltd. By D. Hürlimann, Release 1.5.3. (28.08.2008)] [1] durchgeführt. Die prinzipielle Arbeitsweise von OpenTrack ist Bild 1 zu entnehmen.



**Bild 1:** Datenmodell in OpenTrack.

Um die Eignung der Infrastrukturvarianten für die verschiedenen Fahrplankonzepte zu prüfen, muss die Stabilität der Fahrpläne auf den zugrunde gelegten Infrastrukturvarianten untersucht werden. [2] Hierfür ist es auch erforderlich, die sogenannten Kreuzvarianten abzubilden; dadurch entstehen 4 zu untersuchende Varianten (siehe Bild 2).



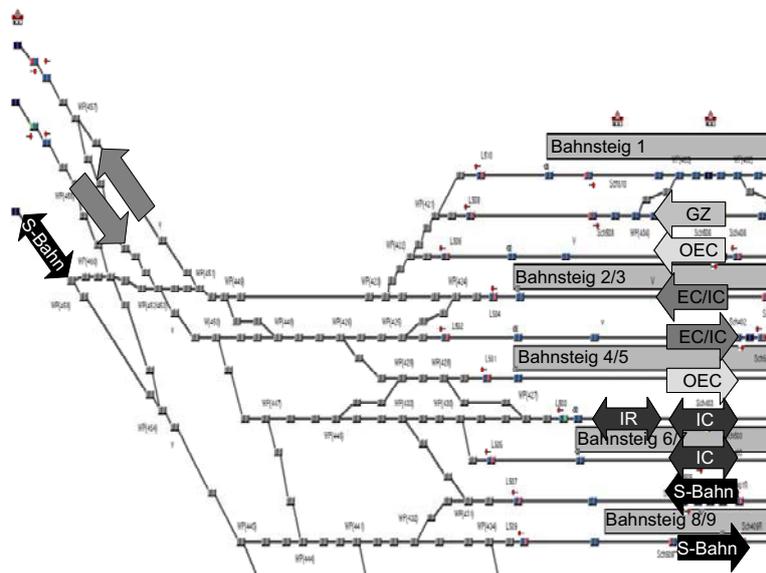
**Bild 2:** Variantenbildung für die Betriebssimulation.

### 3 Die Infrastrukturvarianten und Fahrplankonzepte

Um die Betriebssimulation erfolgreich anwenden zu können, benötigt man für die Infrastruktur die Kilometrierung der Einfahr- und Ausfahrtsignale, sowie die dazugehörigen Geschwindigkeiten und etwaige andere Geschwindigkeitsänderungen für jedes Gleis, die Lage der Haltepunkte und die betrieblich relevanten Parameter (z.B. Festlegung von Teilfahrstraßen und deren Auflösungsbedingungen).

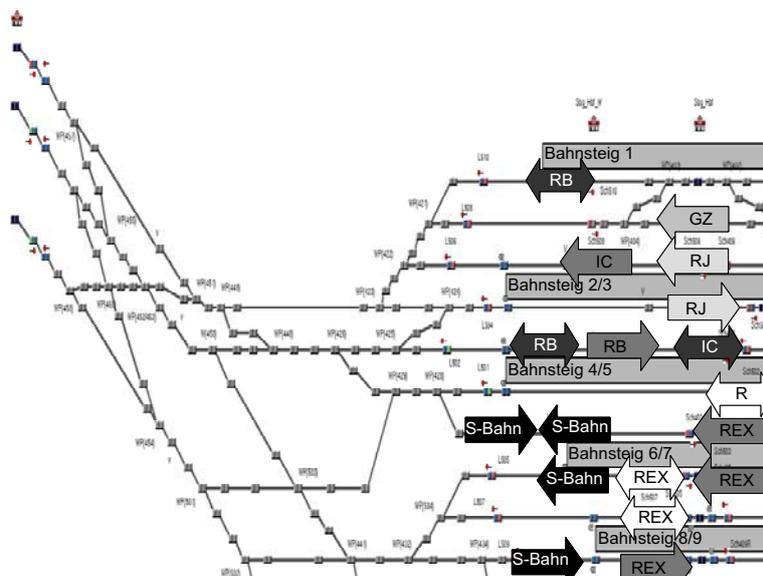
Im Wesentlichen beinhaltet der Hauptbahnhof neun durchgehende Hauptgleise, die über den Hausbahnsteig und vier Mittelbahnsteige mit unterschiedlichen Nutzlängen zwischen 350m und 550m erreichbar sind. Alle Bahnsteiggleise sind mithilfe der Sicherungstechnik in zwei Abschnitte geteilt, die durch die Anordnung von Schutzsignalen sichtbar gemacht werden. Damit sind sowohl besonders signalisierte Einfahrten auf besetzte Bahnsteigkanten als auch das Wenden von Zügen im jeweils besetzten Bahnsteigsektor möglich.

Bezogen auf das zugehörige Fahrplankonzept sieht die Infrastruktur 1 die Streckengleise 1 und 2 von/nach Freilassing für den Personen- und Güterfernverkehr und das Gleis 4 für den S-Bahnverkehr vor. Als Folge dieses Betriebsprogramms sind im Regelfall Paralleleinfahrten aus Richtung Freilassing nicht möglich, wenn derselbe Bahnsteig erreicht werden soll. Das Fahrplankonzept A stellt einen systematisch aufgebauten Richtungsbetrieb an den Bahnsteigen 2/3 und 4/5 dar. Für Reisezüge mit Ausgangspunkt bzw. Ziel Salzburg Hbf. sind insbesondere die Bahnsteige 6/7 vorgesehen und der S-Bahnbetrieb wird auf die Bahnsteige 8/9 konzentriert.



**Bild 3:** Infrastrukturvariante 1  
Westkopf mit schematischer Darstellung des Fahrplankonzeptes A.

Bezogen auf das Fahrplankonzept B sieht die Infrastruktur 2 keine eindeutige Zuordnung zwischen Zugsgattungen und bestimmten Bahnsteigkanten vor. Generell ist zu bemerken, dass nur die Bahnsteige 2/3 ausschließlich dem Fernverkehr vorbehalten sind und sich dort ein Linienbetrieb abzeichnet. Die Streckengleise 1, 2 und 4 von / nach Freilassing sind betrieblich nicht strikt in Fern- und Nahverkehrsgleise getrennt. Diese Gleiskonfiguration mit geänderten Gleisverbindungen lässt daher Paralleleinfahrten aus Richtung Freilassing zu, welche auch gleichzeitig die Unterscheidungsmerkmale zur Infrastrukturvariante 1 darstellt.



**Bild 4:** Infrastrukturvariante 2  
Westkopf mit schematischer Darstellung des Fahrplankonzeptes B.

Erste Ergebnisse zeigten, dass eine infrastrukturelle Beschränkung nur auf den Westkopf für die Mehrfachsimulation nicht ausreichend ist, da in diesem Fall zu viele blockierte Züge entstehen. Daher wurde im Laufe der Arbeit die Infrastrukturen auf den Ostkopf ausgedehnt, der bei beiden Varianten gleich ist, da die Planungsfortschritte für den Ostkopf noch nicht konkretisiert sind.

## 4 Die Simulation

Wichtige Parameter für die Fahrplankonstruktion in OpenTrack sind Eckdaten, wie fixe Abfahrtszeiten und minimale Haltezeiten. Wunschankunftszeiten und Anschlusszüge (Wendezüge) sind weitere Faktoren, die die Fahrplanstabilität beeinflussen können, da dadurch Fahrstraßen- und Bahnsteigbelegungen fixiert werden, die wiederum betriebsbehindernd wirken können.

Das Fahrplanmodell A beschreibt ein getaktetes System, wodurch der Anschauungszeitraum auf eine Stunde begrenzt wird. Wie sich herausstellte, mussten zeitliche Ver-

schiebungen der Taktlagen vorgenommen werden um alle notwendigen Fahrstraßen zu erlauben.

Das Fahrplanmodell B wurde so gewählt, dass die Anzahl der Züge im Betrachtungszeitraum ein Maximum erreichten.

Für die Simulation ist es wichtig, die Eingangsparameter festzulegen. Dazu gehören die verschiedenen Fahrstraßenmöglichkeiten und natürlich die Modellzüge, welche OpenTrack in einer gesonderten Datenbank speichert. Den Modellzügen müssen dann die erlaubten Fahrstraßen mit deren Priorität zugewiesen werden, wobei gesagt werden muss, dass bei dieser Simulation die Anzahl der Prioritäten auf maximal drei beschränkt wird, um noch einen gewissen Überblick zu gewährleisten. Weiters werden den Modellzügen sowohl Ankunfts- als auch Abfahrtszeiten im Hauptbahnhof Salzburg zugewiesen. Sobald diese Eingangsparameter fixiert sind, kann mit der Simulation im Planfall begonnen werden. Es ist wichtig, dass der Planfall konfliktfrei abläuft, das bedeutet, dass weder außerplanmäßige Bremsvorgänge noch Halte oder verspätete Abfahrtszeiten entstehen dürfen. Falls doch Konflikte im Planfall auftreten, muss mittels dispositiver Maßnahmen (Änderung der Fahrstraßenprioritäten) eine Lösung gefunden werden.

In der vorliegenden Arbeit konnte mittels Disposition und einer zeitlichen Verschiebung der Taktlage ein konfliktfreier Planfall für alle vier Varianten hergestellt werden.

Im nächsten Schritt werden Einbruchsverspätungen eingeführt, um den realen Betrieb abzubilden. Die Software OpenTrack erzeugt in der aktuellen Version bis zu 200 Szenarien, wobei jedes einzelne immer wieder dieselben Verspätungen („Pseudo-Zufallszahlen“) simuliert. Für die Mehrfachsimulation des Hauptbahnhofs Salzburg wurden 100 Verspätungsszenarien als ausreichend angesehen, um stabile Ergebnisse zu erhalten.

Offensichtlich kann ein durch Verspätungen gestörter Fahrplan in der Betriebssimulation nicht ohne Konflikte auskommen. Jedoch ist darauf zu achten, dass keine DeadLocks (die Fahrstraßenbelegungen zweier Züge überschneiden sich und eine Weiterfahrt der Züge ist daher nicht möglich) entstehen, da ansonsten die Aussagekraft dieses Verspätungsszenarios nicht gegeben ist und es verworfen werden muss. Die Konflikanzahl kann als Basis zur Bewertung der Fahrplanstabilität herangezogen werden. Im vorliegenden Fall wurde anfangs noch der westliche Weichenkopf Richtung Freilassing abgebildet und simuliert. Die Ergebnisse zeigten allerdings, dass aufgrund der beschränkten Infrastruktur auf der östlichen Seite Richtung Wien zu wenige Dispositionsmöglichkeiten vorhanden waren und daher nicht auflösbare DeadLocks entstanden. Daher wurde die Infrastruktur auf der östlichen Seite Richtung Wien um diesen Weichenkopf erweitert, wodurch die Anzahl der blockierten Züge auf null reduziert werden konnte.

Eine weitere Auswertungsoption in OpenTrack ist die Ausleuchtung der Gleisbelegung nach deren Benutzungshäufigkeit (Züge pro Zeitintervall oder Belegungszeit pro Zeitintervall). Hierbei werden Gleisabschnitte, die auf ihre Belegungsstatistik hin geprüft werden sollen, ausgewählt und nach der Simulation farblich dargestellt. Die Skalierung kann dabei manuell umgestellt und somit auch dem Verkehrsaufkommen angepasst werden. Diese Belegungsoption kann hilfreich sein, als Grundlage zur Beurteilung der Notwendigkeit von einzelnen Weichenverbindungen, die nur im Verspätungsfall dispositiv genutzt werden.

## 5 Ergebnisse

Alle vier Varianten können im Planfall konfliktfrei mit einer Mindestzugfolgezeit von 120sec gefahren werden. Bei diesen ungestörten Modellen entstehen nur geringe Abweichungen der planmäßigen Fahrzeiten bei den Kreuzvarianten.

Nach Durchlauf der Mehrfachsimulation im gestörten Betrieb zeigt sich, dass die Anzahl der Verspätungsszenarien mit Konflikten etwa gleichmäßig verteilt ist.

Ein besonderes Augenmerk muss hier auf das Betriebsprogramm in Zusammenhang mit der Bahnsteigbelegung gelegt werden. Das Betriebsprogramm stellt an und für sich das Fahrplankonzept dar und nimmt Einfluss auf die Bahnsteigbelegung. Eine transparente Bahnsteigbelegung ist allerdings auch wichtig für die Fahrgastorientierung und beeinflusst somit vor allem den Zeitbedarf für den Fahrgastwechsel. Dies schränkt wiederum den Lösungsraum in der Betriebssimulation ein, welche das Fahrplankonzept so umsetzen soll, dass auch die Bahnsteigbelegung in Verspätungsfällen die Einsteige- und Umsteigerelationen der Fahrgäste erhält.

Somit werden auch in Verspätungsfällen nur die jeweils benachbarten Bahnsteigkanten als Dispositionsoption gewählt um den Fahrgastwechsel nicht zu erschweren.

Eine weitere wichtige Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass mit aktiver Disposition (inkl. Zuglaufsteuerung) die Zugfolge unmittelbar im Bahnhofsbereich optimiert werden kann, um zusätzliche Verspätungen durch Auflaufen von Zügen zu verhindern. Hierfür ist allerdings ein Online-Konflikt-Management notwendig, welches Konflikte bei der Zugfolge als auch bei der Bahnsteigbelegung erkennt, wie schon etwa die SBB [3] angedacht haben.

Der Grundgedanke einer fixen Mindestzugfolgezeit im Bahnhofsbereich muss auf jeden Fall weiter entwickelt werden um somit die Kapazitäten zu steigern.

Es stellt sich natürlich die Frage, in wie weit die Mindestzugfolgezeit noch optimiert werden kann um in weiter Folge die Pünktlichkeit der Züge zu erhöhen, indem Konflikte wie ungeplante Bremsvorgänge oder Halte auf der Strecke präventiv verhindert werden. Aufgrund der hohen geplanten Verkehrsdichte wird zur Umsetzung des Betriebsprogramms in der Praxis ebenfalls eine aktive Disposition benötigt, welche sowohl die mögliche Mindestzugfolgezeit als auch die gewünschte Bahnsteigbelegung zur Erhaltung von Anschlussbeziehungen berücksichtigt.

## 6 Literatur

- [1] *Hürlimann, D.*: OpenTrack, Betriebssimulation von Eisenbahnnetzen; Version 1.3.
- [2] *Hürlimann, D.*: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen, Dissertation, Zürich, 2100
- [3] *Laube, F.; Roos, S; Wüst, R.; Lüthi, M. und Weidmann, U.*: PULS 90 – Ein systemumfassender Ansatz zur Leistungssteigerung von Eisenbahnnetzen; ETR-Artikel, Nr. 03; Seite 104-107; März 2007

# **Ein Verkehrssimulator zur Simulation des Kommunikationsaufkommens in einem satellitengestützten Mauterfassungssystem**

Karin Lunde, Florian Mast  
{k.lunde, fmast}@hs-ulm.de  
Institut für Informatik, Hochschule Ulm  
Prittwitzstr. 10, 89075 Ulm

## **Kurzfassung**

Ziel unserer Untersuchungen ist die ereignisbasierte Simulation der Kommunikationsvorgänge in einem flächendeckenden automatisierten Mauterhebungssystem mit satellitengestützter Positionierung der Fahrzeuge, die beispielsweise durch Abrechnungsvorgänge oder durch die Aktualisierung von Softwareständen oder Kartendaten verursacht werden. Um diese Simulation anzutreiben, benötigen wir Trajektorien der mautpflichtigen Fahrzeuge im Erfassungsgebiet, die deren Fortbewegung bezüglich summarischer Kenngrößen wie Durchschnittsgeschwindigkeit, Verkehrsfluss und örtlicher Aufenthaltswahrscheinlichkeit möglichst gut modellieren und jeweils einem individuellen Fahrzeug zuzuordnen sind. Der Artikel stellt einen effizienten und leicht parallelisierbaren Algorithmus vor, der Trajektorien als Zufallspfade auf dem als gerichteten Graphen repräsentierten Hauptstreckennetz berechnet, ergänzt um Streckenanteile im übrigen Gebiet. Es werden erste Ergebnisse eines Projektes diskutiert, das am Beispiel eines Mautsystems in Deutschland, unter Verwendung der Autobahnen als Stütznetz, durchgeführt wurde und in dessen Rahmen die erzeugten Trajektorien als wesentliches Zwischenresultat für die eigentliche Systemsimulation genutzt werden.

## **1 Einleitung**

Im Januar 2005 wurde in Deutschland ein flächendeckendes automatisiertes Mauterfassungssystem eingeführt, das auf der Positionsbestimmung der Fahrzeuge durch Navigationssatelliten beruht. Schon die Inbetriebnahme der neuen Technologie verlief nicht reibungslos, und man kann sich leicht vorstellen, dass Modifikationen der zugrundeliegenden Algorithmen im Feldversuch gravierende Folgen und Kosten für Kunden und Betreiber nach sich ziehen könnten. Simulation ist ein Mittel, um dieses Risiko zu mindern.

Der hier vorgestellte Verkehrssimulator dient zur Generierung von Routen, die von mautpflichtigen Fahrzeugen zurückgelegt werden und die als Eingangsdaten für die Simulation des Kommunikationsaufkommens in einem solchen automatisierten Mauterfassungssystem genutzt werden. Kommunikation findet während der Fortbewegung der Fahrzeuge im Erfassungsgebiet aus den unterschiedlichsten Gründen statt, zum Beispiel zur Abwicklung der Abrechnungsprozesse, zur Aktualisierung der im Fahrzeug vorhandenen Kartendaten oder der Software selbst. In der Regel werden die Daten über Mobilfunknetze ausgetauscht. Die Häufigkeit und der Umfang dieser Kommunikation, in Abhängigkeit von den verwendeten Strategien, sind der Hauptgegenstand unserer Untersuchungen, die am Beispiel der nach dem deutschen Autobahnmautgesetz [1] mautpflichtigen schweren LKWs durchgeführt werden. Die

Ausgestaltung des eigentlichen Tarifschemas ist dabei insofern nachrangig als dass die Art und der Umfang der zu übertragenden Daten von der eingesetzten Erkennungstechnologie (z.B. lokales Map Matching, lokale POI Erkennung oder – datenschutzrechtlich bedenkliche – zentrale Lösungen mit dumb clients als reine GPS-Spur-Lieferanten) dominiert wird. Diese Simulation soll zum Vergleich solcher Verfahren bzgl. Kommunikationsaufkommen und lokalem Speichervolumen dienen. Durch die Simulation sollen Kosten für den Betreiber minimiert und Risiken evaluiert werden, indem beispielsweise die Auswirkungen eines teilweisen Ausfalls wesentlicher Ressourcen wie Zentralrechner oder Kommunikationsnetz analysiert werden.

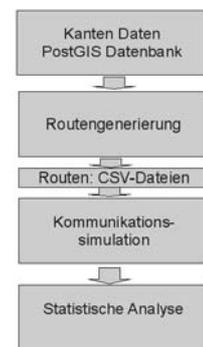
Die Kommunikationssimulation basiert auf diskreten Events (siehe [3]); als Simulationswerkzeug benutzen wir Omnet++ (vorgestellt in [14]). Events sind solche Ereignisse, die den Status eines Fahrzeugs bezüglich der relevanten Größen verändern. Verkehrssimulation und Kommunikationssimulation sind weitgehend entkoppelt und nur über Eventlisten verbunden; das nebenstehende Bild zeigt die Struktur des gesamten Simulationsframeworks. Aufgabe des Verkehrssimulators ist es, Trajektorien der mautpflichtigen Fahrzeuge im Erfassungsgebiet zu generieren und daraus zeitlich geordnete Listen von Events (jeweils mit Zeitstempel und geografischer Position) zu erzeugen, beispielsweise

- OBU <OBU\_ID> aktiviert bzw. deaktiviert (Zündschlüssel);
- OBU <OBU\_ID> in Segment <SEG\_ID> des Stütznetzes eingefahren;
- OBU <OBU\_ID> aus Segment <SEG\_ID> des Stütznetzes ausgefahren.

Diese Eventlisten bilden die abstrakte Schnittstelle zur Kommunikationssimulation. OBU steht hier für *on-board unit*, also den Bordrechner, der auf jedem mautpflichtigen Fahrzeug vorhanden ist, das an der satellitengestützten Mauterhebung teilnimmt. Die Bestimmung der aktuellen Position eines Fahrzeugs geschieht in der Realität über das Global Positioning System (GPS).

Man kann die Fahrzeuge bzw. OBUs als mobile und verteilte Agenten ansehen (siehe [11]). Aus unserer Sicht handelt es sich bei der Simulation des Mauterhebungssystems trotzdem nicht primär um eine Multiagentensimulation, da die in jeder OBU enthaltene Logik durch endliche Zustandsautomaten vollständig beschreibbar ist und eine direkte Interaktion zwischen den OBUs, die intelligente Entscheidungen verlangen würde, nicht im Fokus der Analyse steht. Eine mittelbare Kopplung der OBU-Zustände durch den Zugriff auf (evtl. begrenzte) zentrale Ressourcen ist allerdings Teil des Modells.

In diesem Beitrag sollen der Algorithmus zur Erzeugung der Routen von Fahrzeugen im Erfassungsgebiet und einige Simulationsergebnisse vorgestellt, sowie die Grenzen und Vorteile des Verfahrens diskutiert werden.



## 2 Die Verkehrssimulation

### Anforderungen

Einen Überblick über Ansätze zur Verkehrssimulation geben Brilon et al. in [5], wie auch Flötteröd in [8]. Mikroskopische Ansätze modellieren jeden Verkehrsteilnehmer und sein Verhalten, z. B. über Differentialgleichungen oder zelluläre Automaten [10] und sind naturgemäß aufwendig, aber gut geeignet, um lokale Phänomene zu analysieren, die auf der Interaktion zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmern beruhen. Makroskopische Ansätze sehen hingegen vom Individuum ab und nutzen Modelle aus der Strömungslehre, um summarische Phänomene wie Verkehrsflüsse oder Durchschnittsgeschwindigkeiten zu beschreiben. Beide Ansätze lassen sich kombinieren in Form mesoskopischer Verfahren (zum Beispiel [6], [9], [4]). Der Fokus liegt bei solchen Kombinationen häufig auf der Verbesserung der Performance bei gleichzeitiger Mikro-Modellierung in bestimmten lokal begrenzten Problemgebieten, z.B. Stauarealen, Unfallschwerpunkten oder zentralen Kreuzungen mit Verkehrslenkung. Die simulierte Zeit beschränkt sich dabei oft auf wenige Stunden.

Die abstrakte Schnittstelle würde es leicht erlauben, aus dem Ergebnis einer mikro- oder mesoskopischen Verkehrssimulation die benötigten Eventlisten zu erzeugen. Dagegen spricht jedoch aus Sicht unserer Anwendung der hohe Aufwand im Vergleich zum nutzbaren Ergebnis. Für die Kommunikationssimulation sind wir lediglich an Trajektorien der mautpflichtigen Fahrzeuge interessiert, die wenige summarische Kenngrößen wie Verkehrsfluss, Durchschnittsgeschwindigkeit, Tagesgang der LKW-Dichte auf dem Autobahnnetz sowie die örtliche Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Erfassungsgebiet reproduzieren sollen. Mautpflichtig sind in Deutschland nach dem Autobahnmautgesetz [1] Nutzfahrzeuge ab 12 t zulässigem Gesamtgewicht; diese stellen laut statistischem Bundesamt weniger als 10% aller zugelassenen Fahrzeuge ([12], Stand 1.1.2008). Es gibt neben der automatisierten Mauterfassung auch noch die Möglichkeit der manuellen Abrechnung, die aber durch unser Modell bisher nicht abgebildet wird. Nach Angaben des Betreibers [13] werden mittlerweile über 90% der Mautbuchungen im automatischen Verfahren abgewickelt; 650.000 OBUs sind registriert. Für die Simulation des bei lokalen (also auf der OBU ablaufenden) Mauterkennungsverfahrens durch Akkumulation von Kartendaten verursachten Speicherbedarfs und Kommunikationsaufkommens sind besonders Trajektorien mit einer großen geografischen Reichweite wesentlich. Um dabei den stationären Zustand zu erreichen, streben wir einen Simulationszeitraum von 4-12 Wochen an.

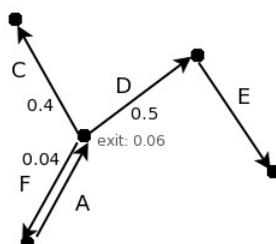
Diese zeitlichen und geografischen Anforderungen sprechen für eine makroskopische Simulation, zumal sowohl die verfügbaren Daten als auch die Analyseziele der Kommunikationssimulation stark vom einzelnen Fahrzeug abstrahieren. Andererseits müssen jedoch für die eventbasierte Kommunikationssimulation die Trajektorien für jedes individuelle Fahrzeug vorliegen, insbesondere für die Analyse des Speicherbedarfs, der durch die Verwaltung der geografischen Karteninformation pro OBU verursacht wird. Aus diesen Gründen wurde ein Mittelweg in Form eines vergleichsweise einfachen Algorithmus gewählt, der die Bewegung eines einzelnen Fahrzeuges über das Stütznetz in Form eines Random Walks verfolgt, unter Verwendung von

Verzweigungswahrscheinlichkeiten, die den mittleren Verkehrsflüssen entsprechen. Verzweigungen aus dem Stütznetz heraus führen zu Trajektorienanteilen, die für die Mauterfassung weniger, aber für andere Kommunikationsvorgänge wie z.B. Updates durchaus relevant sind. Die entstehenden Zufallspfade auf dem Streckennetz sowie im nachrangigen Gebiet werden als Trajektorien der mautpflichtigen Fahrzeuge interpretiert und daraus, zusammen mit Annahmen über die Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die benötigten Events berechnet.

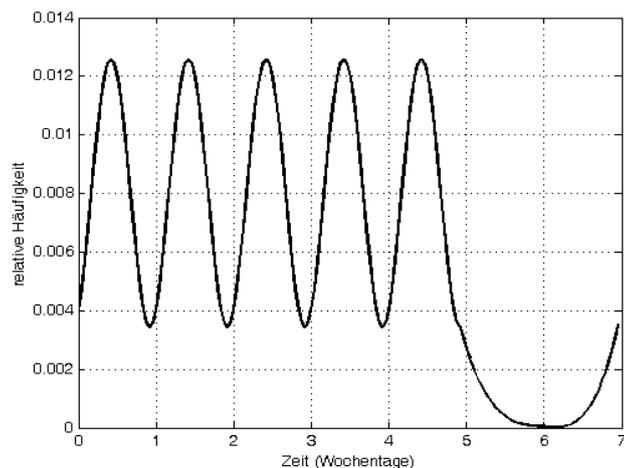
## Der Algorithmus

Das Stütznetz wird durch einen gerichteten Graphen repräsentiert, in dem die Kanten Autobahnsegmenten und die Knoten den Abfahrten entsprechen. In Deutschland kann dieses Stütznetz so gewählt werden, dass es die mautpflichtigen Straßenabschnitte abbildet, es enthält dann nicht nur Autobahnen, sondern auch einige verbindende Bundesstraßen. Jedes reale Straßensegment ist im Graphen durch zwei Kanten repräsentiert, in Hin- und Gegenrichtung. Der Graph des deutschen mautpflichtigen Straßennetzes (siehe [2]) umfasst etwa 5000 Kanten und doppelt so viele Knoten.

Alle Kanten, die von einem Knoten ausgehen, sind mit Verzweigungswahrscheinlichkeiten markiert, die zum Würfeln der nächsten zu durchfahrenden Kante benutzt werden können (siehe Bild 1). Die Differenz zwischen 1 und der Summe der Wahrscheinlichkeiten aller ausgehenden Kanten ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Autobahn an diesem Knoten verlassen wird. Diese Daten sind prinzipiell durch Toll Collect messbar, aber nicht öffentlich verfügbar. Daher wurden die Exitwahrscheinlichkeiten für alle Knoten als identisch angenommen, auch die Verzweigungswahrscheinlichkeiten für alle aus einem Knoten ausgehenden Kanten wurden gleich gewählt (mit Ausnahme der direkt zurückführenden Kante). Sollten in Zukunft reale Daten zur Verfügung stehen, basierend z.B. auf den gemittelten Verkehrsflüssen oder gewonnen aus Verkehrszählungen, können diese leicht in den Algorithmus eingebracht werden, um die Realitätsnähe der simulierten Routen weiter zu erhöhen.



**Bild 1:** Autobahnsegmente mit Verzweigungshäufigkeiten als gerichteter Graph (links) und die angenommene Verteilung der Tourstarts (rechts).

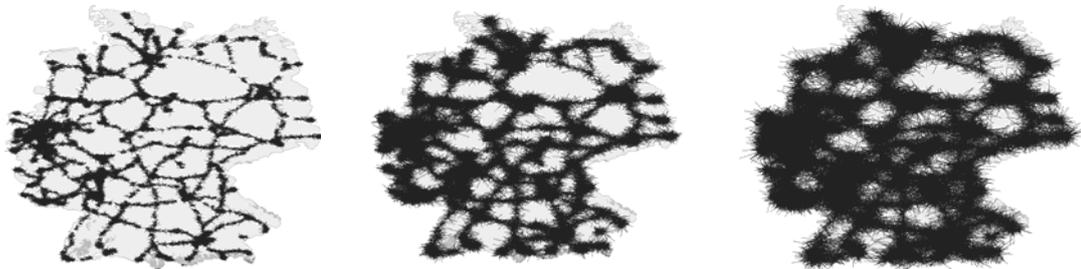


Wesentlicher Parameter des vorgestellten Modells ist die Häufigkeitsverteilung der Tourstartzeitpunkte der mautpflichtigen Fahrzeuge über eine Woche. Sie modelliert an den Wochentagen einen sinusförmigen Tagesgang mit verminderter Aktivität während der Nächte, sowie eine stark zurückgehende Aktivität am Wochenende. Die Tourstartaktivität nimmt erst am Ende des Wochenendfahrverbots (in Deutschland um 22 Uhr) wieder zu.

Der Random Walk für eine einzelne OBU folgt dem Algorithmus:

1. Würfeln einer Liste von Startzeitpunkten für Routen im gewählten Simulationszeitraum, entsprechend der Tourstart-Verteilung.
2. Für jeden Startzeitpunkt:
  - a. Würfeln eines Startsegments entsprechend der Verteilung der Starthäufigkeiten, ggf. unter Berücksichtigung der Endposition der vorhergehenden Route;
  - b. Solange das mautpflichtige Netz nicht verlassen wird:
    - i. Würfeln einer Durchschnittsgeschwindigkeit für das aktuelle Segment und Erzeugen des Zeitstempels für das Segmentende (Event);
    - ii. Auswahl des nächsten zu durchfahrenden Segments bzw. Verlassen des mautpflichtigen Netzes, entsprechend den im Graph angegebenen Verzweigungswahrscheinlichkeiten.

Neben dem Verhalten der Fahrzeuge auf dem Stütznetz spielen für die Kommunikationssimulation auch die (für einen Großteil der LKWs zunächst als vergleichsweise kurz angenommenen) Zeiträume eine Rolle, in denen sich das Fahrzeug auf dem nachrangigen Straßennetz befindet. Während dieser Zeiträume kann sich zwar (nach dem in Deutschland geltenden Tarif) der mautrelevante Zustand der OBU nicht ändern, aber es können Softwareupdates oder Updates der Karteninformation stattfinden. Außerdem werden sich hier die meisten Abstellzeiten (OBU ausgeschaltet) wiederfinden. Aus diesem Grund wurde der Random Walk über das (mautpflichtige) Stütznetz ergänzt durch ein stark vereinfachendes Modell des Fahrzeugverhaltens zwischen der Aktivierung der OBU und Auffahrt auf das Stütznetz einerseits und Abfahrt vom Stütznetz und anschließender Deaktivierung der OBU andererseits. Hier fließen Annahmen über die Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge, über Pausenzeiten der Fahrer und den geografischen Zusammenhang zwischen zwei aufeinanderfolgenden Routen mit ein. Einen Vergleich der Flächenabdeckung der simulierten Routen für verschiedene Durchschnittsgeschwindigkeiten  $v_{avg}$  außerhalb des Stütznetzes findet man in Bild 2.

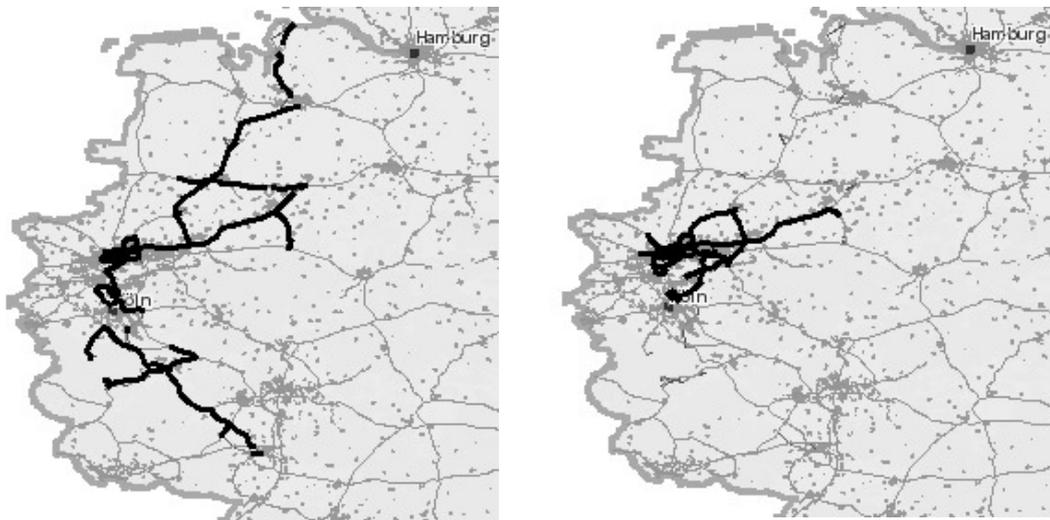


**Bild 2:** Vergleich der Flächenabdeckung bei verschiedener Wahl des Geschwindigkeitsparameters außerhalb des Stütznetzes (von links:  $v_{avg} = 5; 12.5; 20$  km/h).

## Validierung und Diskussion

Der Algorithmus berücksichtigt Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Fahrzeugen (z.B. durch Staubildung) nicht explizit, wie auch die Präsenz anderer, nicht mautpflichtiger Fahrzeuge. Solche Abhängigkeiten spiegeln sich nur in stark abstrahierter, kumulierter Form in den Geschwindigkeitsverteilungen wieder. Diese Unabhängigkeit der einzelnen Fahrzeuge voneinander erlaubt es jedoch, die Generierung von Routen für eine große Anzahl von Fahrzeugen auf mehrere Prozesse zu verteilen und so zu parallelisieren.

Das oben vorgestellte Modell wird auf zwei Ebenen validiert. Zum einen werden die statistischen Eigenschaften von generierten Routen mit analytisch direkt aus den Modellparametern ableitbaren Erwartungen verglichen, zum anderen mit zugänglichen Verkehrsstatistiken. Grundsätzlich sind Abweichungen bei der Verkehrsverteilung im Netz sowie bei Tourlängen zu erwarten, da der Algorithmus keinerlei Start-Ziel-Planung mit einbezieht, sondern an jeder Ausfahrt lokal entscheidet, wie die Route fortgesetzt und ob sie beendet werden soll. Dies ist auch an der Gestalt der generierten Routen sichtbar, die oft wenig geradlinig verlaufen (vergleiche Bild 3). Abhilfe könnte die Modellierung mehrerer Ensembles mit verschiedenen Eigenschaften schaffen, beispielsweise Transitverkehr mit sehr langen Routen, Inlandsverkehr mit mittellangen und lokaler Verkehr mit kurzen Routen. Die Modellparameter (Häufigkeitsverteilungen und Verzweigungswahrscheinlichkeiten) müssten dann für jedes Ensemble separat modelliert werden; beispielsweise wären die Ausfahrtswahrscheinlichkeiten für Transitfahrzeuge deutlich kleiner als für lokale Lieferfahrzeuge, und Transitfahrzeuge würden im Gegensatz zum lokalen Lieferverkehr zu einem wesentlichen Anteil an Landesgrenzen oder Häfen starten.



**Bild 3:** Generierte Routen für ein einzelnes Fahrzeug, im Verlauf einer Woche.

Auch zeitliche Abhängigkeiten der Verzweigungswahrscheinlichkeiten oder der Startposition werden von den verwendeten Verteilungen nicht berücksichtigt, könnten aber in der Praxis durchaus eine Rolle spielen. Zusammenfassend kann man sagen, dass die simulierten Trajektorien nicht repräsentativ für das Verhalten einzelner Fahrzeuge sind, jedoch im Ganzen ein Bild ergeben, das den Verkehrsfluss auf dem mautpflichtigen Streckennetz im Mittel gut wiedergibt und als Treiber für die Kommunikationssimulation geeignet ist.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Modellierung der Bewegung von mautpflichtigen Fahrzeugen in einem Erfassungsgebiet unter Nutzung eines Stütznetzes durch Random Walk ist es gelungen, effizient Eingangsdaten für eine eventbasierte Simulation des Kommunikationsaufkommens in einem automatisierten Mauterhebungssystem zu erzeugen. Der Algorithmus gestattet die Implementierung als verteilte Anwendung, was die Erzeugung von Routen für eine große Anzahl von Fahrzeugen über einen langen Simulationszeitraum in realistischer Laufzeit ermöglicht. Eine Implementierung des Algorithmus in Java ([7]), die mit mehreren Threads arbeitet, berechnet auf einem PC mit Intel Core 2 Duo T7500 (2.2 GHz) und 4 GB Arbeitsspeicher Routen und Eventlisten für 100.000 Fahrzeuge über einen Simulationszeitraum von 4 Wochen in etwa 6 Minuten, wobei sich 20 Threads als optimal erwiesen haben. Die Laufzeit skaliert linear mit der Anzahl der simulierten Fahrzeuge.

Die Validierung ergab, dass die simulierten Trajektorien zwar nicht repräsentativ für das Verhalten einzelner Fahrzeuge sind, jedoch wichtige summarische Kenngrößen wie mittlere Verkehrsfrequenzen im Stütznetz mit ausreichender Genauigkeit reproduzieren. Noch realistischere Trajektorien könnte man gewinnen, indem man Teilensembles mit unterschiedlichen Eigenschaften modelliert. Eine Einbeziehung von Interaktionen der mautpflichtigen Fahrzeuge untereinander oder mit anderen Verkehrsteilnehmern (z.B. Verlangsamung durch Stau oder Ausweichen auf Nebenstrecken) ist mit dem geschilderten einfachen Ansatz nicht möglich. Die Schnittstelle zur Kommunikationssimulation ließe es jedoch zu, die benötigten Eventlisten aus einer mikro- oder mesoskopischen Verkehrssimulation heraus zu erzeugen. Ein Vergleich von verschiedenen Abstraktionsgraden bei der Verkehrsmodellierung wäre für die Zukunft sehr interessant.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Industrieprojekts *Systemsimulation Automated Toll Detection* durchgeführt, das von der Satellic Traffic Management GmbH gefördert wird. Wir danken insbesondere unseren Domänenexperten Dr. Marc-André Funk und Dr. Uwe Leinberger<sup>†</sup> für zahlreiche stimulierende Diskussionen.

### 4 Literatur

- [1] Autobahnmautgesetz für schwere Nutzfahrzeuge in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3122).
- [2] *Bundesanstalt für Straßenwesen: Mauttabelle.* [www.mauttabelle.de](http://www.mauttabelle.de) (10.07.09).

- [3] *Banks, J.:* Discrete-Event System Simulation. Prentice-Hall, 2004.
- [4] *Burghout, W. and Koutsopoulos, H. and Andreason, I.:* A discrete-event mesoscopic traffic simulation model for hybrid traffic simulation. In Proceedings of the 9<sup>th</sup> IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2006.
- [5] *Brilon, W. and Huber, F. and Schreckenberg, M. and Wallentowitz, H.:* Traffic and Mobility. Springer, 1999.
- [6] *Espie, S. and Gattuso, D. and Galante, F.:* A hybrid traffic model coupling macro and behavioral microsimulation. In Proceedings of the 85<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C. (USA), 2006.
- [7] *Falk, A.:* Entwicklung und Optimierung einer objektorientierten Software zur Simulation von LKW-Routen auf dem Autobahnnetz. Bachelorarbeit, Hochschule Ulm, August 2009.
- [8] *Flötteröd, G.:* Traffic-State Estimations with Multi-Agent Simulations. Dissertation TU Berlin, 2008.
- [9] *Flötteröd, G. and Nagel, K.:* High speed combined micro/macro simulation of traffic flow. In Proceedings of the 10<sup>th</sup> IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2007.
- [10] *Nagel, K. and Schreckenberg, M.:* A cellular automaton model for freeway traffic. J. Phys. I France 2, 1992.
- [11] *Raffel, W.-U.:* Agentenbasierte Simulation als Verfeinerung der Diskreten-Ereignis-Simulation unter besonderer Berücksichtigung des Beispiels fahrerloser Transportsysteme. Dissertation, FU Berlin, 2005.
- [12] *Statistisches Bundesamt.* Statistisches Jahrbuch 2008 für die Bundesrepublik Deutschland, S. 427.
- [13] *TollCollect:* Vier Jahre LKW-Maut in Deutschland. Pressemitteilung vom 19.12.08. <http://www.toll-collect.de> (zuletzt besucht am 5.7.09).
- [14] *Varga, A. and Hornig, R.:* An overview of the Omnet++ simulation environment. Simutools '08: Proceedings of the 1st international conference on simulation tools and techniques for communications, networks and systems. Rom, 2008.

# Dynamische Lagerstrategieoptimierung in der Distributionslogistik

Martin Saler, Martin Dobler und Philipp Thurnher  
{martin.saler; martin.dobler; philipp.thurnher}@v-research.at  
Technische Logistik / V-Research  
Stadtstraße 33 / A-6850 Dornbirn

## Kurzfassung

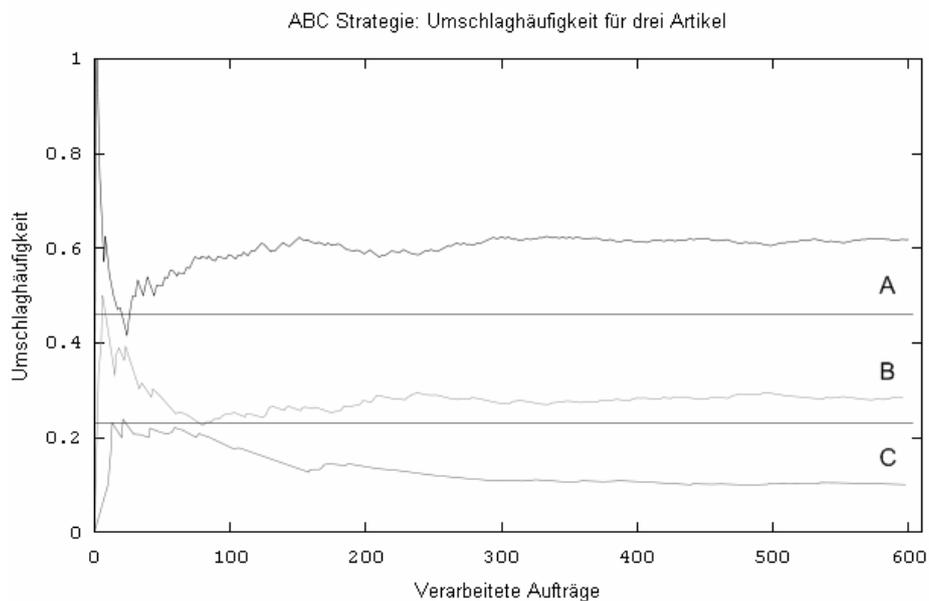
V-Research entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Logistikkonzern *Gebrüder Weiss* (GW) den *Dynamischen Prozesskonfigurator*, kurz *DynaPro* [1]. DynaPro dient GW in der vorliegenden Implementierungsphase zur Planung und Analyse von Lagern mittels der Simulation. GW nimmt als Logistikdienstleister die Position zwischen Produzent und Endkunde ein und übernimmt somit die (Zwischen-)Lagerung von Artikeln. Wenn ein neues Lager gebaut oder bestehende Lager analysiert werden, entstehen eine Reihe von Anforderungen und Fragestellungen hinsichtlich der Abwicklung von Lagerungsprozessen. Zu diesen Prozessen gehören die Warenannahme, Vereinzeln, Einlagerung, Umlagerung, Kommissionierung, Verpackung und der Warenausgang (vgl. [2]). DynaPro ist hierbei ein Werkzeug, welches einem Planer von GW erlaubt, Prozesse zu definieren und diese für ein definiertes Lager zu simulieren. Die Bestimmung einer oder mehrere Stellplätze für einen Prozess bestimmt in DynaPro das Modul *StrategieManager*. Der StrategieManager wählt hierbei unter Berücksichtigung der gewünschten Strategie und der Art des Prozesses mögliche Stellplätze aus, filtert und/oder sortiert sie nach den Kriterien der Strategie und überträgt diese an den Prozess, welcher zur Zeit ausgeführt wird.

Lagerstrategien werden in der Regel nach Prozessstyp unterschieden [3]. Einlagerungsprozesse haben für sie typische Einlagerungsstrategien, genauso haben Auslagerungsprozesse Auslagerungsstrategien. Ein Beispiel einer Strategie für die Einlagerung ist die ABC-Strategie [4]. Hierbei werden die Stellplätze eines Lagers in drei Bereiche unterteilt und jeder Bereich mit einem Wertebereich einer Eigenschaft versehen. Bei der ABC-Strategie ist diese Eigenschaft häufig der Weg zum Wareneingang und Warenausgang, die Umschlagshäufigkeit oder der Preis der gelagerten Ware pro Einheit. So zum Beispiel werden Artikel mit einer hohen Umschlagshäufigkeit näher am Warenausgang (A-Bereich), Artikel mit einer mittleren Umschlagshäufigkeit im mittleren Lagerbereich (B-Bereich) und Artikel mit einer geringen Umschlagshäufigkeit im hinteren Lagerbereich (C-Bereich) gelagert.

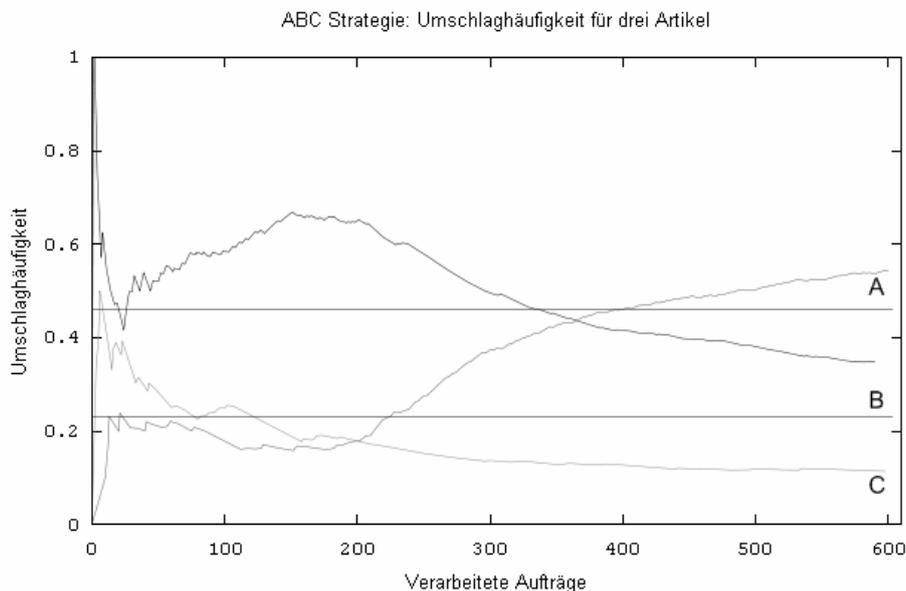
Andere Beispiele für Lagerstrategien sind FIFO/LIFO, gemindertes FIFO/LIFO, Restmengen bevorzugen, Mengenanpassung, etc.. Lagerstrategien besitzen in der Regel Parameter zur Anpassung. Bei der ABC-Strategie ist die Wahl der Artikel, welche einem Bereich zugeordnet sind, ein entscheidender Faktor (Parameter). Ein anderes Beispiel ist die Strategie des geminderten FIFO/LIFO, bei welcher eine Zeitspanne (Unschärfe) als Parameter zu wählen ist.

Die Wahl der Strategieparameter bei der Durchführung einer Simulationsstudie kann auf zwei Wegen erfolgen. Die erste Variante ist eine händische Einstellung der Parameter

auf fixe Werte. Bei dieser Variante wird eine Reihe von Simulationsläufen durchgeführt und die Resultate werden mit einer Kostenrechnung bzw. Kennzahlen [5] und [6] verglichen um abschließend die best möglichen Parameter auszuwählen. Die zweite, in diesem Beitrag vorgeschlagene Methode, stellt eine dynamische Variante dar. Hierbei werden die Parameter der Strategien während der Durchführung eines Simulationslaufes geändert. DynaPro fällt somit Entscheidungen während der Laufzeit, welche Parameter von Strategien zu Gunsten der (Kosten-)Optimalität angepasst werden. Im Beispiel der ABC-Strategie kann sich somit die Zuordnung von Artikeln zu den drei Bereichen dynamisch während eines Simulationslaufes ändern. In einem realen Lager würde dies einem Planer entsprechen, der die geänderte Umschlagshäufigkeit eines Artikels erkennt und dementsprechend den im Warenmanagementsystem hinterlegten Bereich des Artikels ändert. Ein Beispiel für drei Artikel mit gleichbleibenden Lagerbereichen gemessen an der Umschlagshäufigkeit über 600 Einlagerungsaufträge ist in Bild 1 gegeben. Ein Beispiel mit drei Artikel mit sich ändernden Lagerbereichen gemessen an der Umschlagshäufigkeit ist in Bild 2 gegeben. Die horizontalen Linien stellen die Grenzen der Umschlagshäufigkeiten für die ABC-Bereiche dar. In der ersten Abbildung bleiben die Artikel – nach einer Einschwingphase – in ihren Bereichen. In der zweiten findet ein Wechsel eines A-Artikels zu einem B-Artikel, eines C-Artikels zu einem A-Artikel und eines B-Artikels zu einem C-Artikel während der Durchführung der Einlagerungen statt.



**Bild 1:** Konstante ABC-Bereiche gemessen an der Umschlagshäufigkeit



**Bild 2:** Wechselnde ABC-Bereiche gemessen an der Umschlaghäufigkeit

Das Anlegen und Parametrieren von Strategien mittels des *StrategieEditor* sowie die dynamische Optimierung zur Laufzeit werden im Beitrag näher diskutiert und Anhand eines Praxisbeispiels illustriert.

## Literatur

- [1] März, L. und Saler, M.: Ein Analyse-, Planungs- und Entscheidungsinstrument für Lagerlogistikanwendungen. In Markus Rabe (Hrsg.), *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008. S. 237-245.
- [2] Gudehus, T.: *Logistik 1 – Grundlagen, Verfahren und Strategien, Systeme und Lieferketten*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000.
- [3] ten Hompel, M. und Schmidt, T.: *Warehouse Management – Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen*. 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [4] Ford Dickie, H.: ABC inventory analysis shoots for dollars, not pennies. *Factory Management and Maintenance*, Volume 109, Pages 92-94, 1951.
- [5] Nyhuis, P. und Wiendahl, H.P.: *Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [6] Schulte, C.: *Logistik – Wege zur Optimierung der Supply Chain*. 4. Auflage. Vahlen Verlag, 2004.

# **The Impact of Seaborne Transportation on Environmental Challenges: The Role of Simulation**

Dietmar P.F. Möller, Philip Becker, Thomas Müller, Jochen Wittmann  
*dmoeller@informatik.uni-hamburg.de*  
*University of Hamburg, Germany*  
Faculty of Informatics, Vogt-Kölln-Str. 30, 22527 Hamburg

## **Abstract**

The paper presents an integrative approach on seaborne transportation and its impact on environmental challenges. The political debate about economic impact of transportation investment is concerned with the environmental and social costs of transport. It is widely recognized and accepted that transport is unsustainable in relation to its environmental interference. Hence it is strongly argued that longer term economic objectives of transport policy has to be compatible with ecological and social objectives. Henceforth, environmental sustainability will become one of the most important conceptual criteria in the arrangement of intermodal transport, and in particular in seaborne transportation. This has been determined as result of the European Motorways on the Sea concept. To achieve this goal and to evaluate suchlike sustainable concepts an integrated framework of seaborne transport, which is based on specific simulation models, has to be compiled.

## **1. Introduction**

The efficient and effective movement of freight is a critical component in the transformation and growth of the worldwide economy. The European economy has experienced dramatic changes in composition and structure over the past five decades. In recent years, the changes have been most evident in the rapid growth of the automotive and aerospace industry, agricultural, and natural resources industries, etc. But, transportation in the next century has to have to be much more convenient, ecological, effective, flexible, etc., than today's transportation systems in order to handle the volume of people and freight that is projected worldwide. To achieve this goal transportation of people and freight will have to be connected with the multiple modes of transportation like plane, rail, ship, truck, car. To improve the existing transportation chains at the very first in a more cost effective way one need innovative means of tying the existing modalities together and making each one more efficient.

In case of freight intermodal transport will have to be realized without handling of the freight when changing modes. Henceforth, intermodal transportation will offer intrinsic possibilities to reduce freight handling allowing freight to be transported faster, as well improving security, and may reduce damages and loss. Therefore reduced cost versus

over the intermodal resources is a key benefit for the intercontinental use of intermodal transportation chains.

In addition to the debate about the economic impacts of new transportation investments policy is equally concerned with the environmental and social costs of transport. It is now widely recognized and accepted that transport in Europe is unsustainable, and that the trend-based path of continuous and continuing growth is unacceptable. Hence it is strongly argued that longer term economic objectives of transport policy has to be compatible with ecological and social objectives.

Beside costs and a better efficiency the dependence on fossil fuels of transportation remains a crucial objective in an environmental perspective and is a common denominator for intermodal transportation. Because the growth in intermodal transportation contributes to increasing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions and henceforth to climate changes, consolidated as phenomena of global warming, for which Al Gore and the U.N.'s Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) won the 2007 Nobel Peace Prize.

Transportation that will become sustainable has to take into account the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions and henceforth to climate changes, which have to be considerably be lowered in spite of the of continuous and continuing growth of transportation on a nation as well as on a world wide scale.

According to the EU White Paper on Transport Policy, the transport sector accounts for 28% of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in Europe, of which 84% can be attributed to road transports of people and cargo. This is one of the major reasons for an early integration of environmental considerations into the intermodal transportation chain.

Compared with automobile traffic, where road conditions, traffic density, tire pressures, individual driving styles, route planning or unnecessary ballast can mean higher or lower fuel consumption, and as a result more or less carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, seaborne transportation not only causes environmental impact on a world wide level; it also occurs at a local level. Beside these options, environmental sustainability will become one of the most important conceptual criteria in the arrangement of intermodal transport chains. To achieve this goal and to evaluate suchlike sustainable concepts an integrated framework of the sea transport system, which is based on specific simulation models, has to be compiled.

Due to the high complexity of the marked problems this task can not be accomplished by only one scientific discipline rather than the cooperation of different disciplines and, as an additional information source, the more praxis oriented contributions of different industrial partners.

## **2. The Simulation Approach**

For the future design and assessment of intermodal transportation chains, simulation will be used as distinguished tool to analyze the cost and benefit of various transportation chains, However, applying simulation the transportation procedures are to be represented in a simplified manner, alongside

- technical and economical benchmarks,
- ecological benchmarks

of the transportation unit of the transport chain should be accomplished.

Hence several complementary simulation models as common transformation denominator of the intermodal transportation chain, including the reloading points, e.g. harbor, have to be developed.

The challenge and innovation of this projection lies in the so called integrated system approach, that allows the entanglement of the several models, methodological concepts and the intermodal transportation, with the common denominator air plane, rail, ship, truck, car..

This conceptualization will allow to use the developed model(s) in a stand alone manner as well as within a network. This architectural concept also afford to analyze the individual transportation chain elements as well as the intermodal transportation system as a whole.

This procedure permits a design suchlike a container ship, with its interaction between the ambient infrastructure as well as with the whole environment in order to identify the weakest point within the whole chain as well as in the whole conceptualization.

For the design of the model(s) framework current programming languages and simulation systems are to be used which will allow a hardware independent use of the developed model.

Henceforth, this paper approaches the problem by a top-down-concept in order to integrate

- a) the complete transportation chain,
- b) evaluations concerning travelling time, costs, environmental impact, etc.
- c) the different views of the participating stakeholders.

Due to this intrinsic complexity mentioned above the approach will have to be much more model based to benefit from knowledge represented by already existing models and intends to offer a framework for easy experimentation with new technical developments given by variations of the corresponding model components. Main intention, however, is the ability to optimize the intermodal transportation by easily switching between the given alternatives for every step in the transportation chain, even by variation the means of transportation. Henceforth, the paper will have to show that three topics are of specific relevance and interest in this context:

- a) valid composition of the intermodal transport chain from a given set of model components
- b) finding and evaluation of optimization criteria as well as for the different levels of abstraction as for the individual stakeholders
- c) specification of the intermodal nodes, where the means of transport is changed
- d) provision of the physical characteristics of the various transport vehicles.

### **3. Seaborne Transportation System**

According to the objective of an integrated valuation and optimization of transportation processes, an over-all approach concerning the means of transportation and the combination of people and freight seems to be adequate. Therefore the following objects (in the sense of an object oriented model design) should be represented:

- people as passengers
- freight as containers and individual packages

In addition the overall system architecture of the models has to be designed in a way, that various level of detail will be represented in the modelling. Further on it is mandatory to represent the physical key characteristics of the different transport vehicles, which are needed to assess the economic and environmental impact of a transportation vehicle in a comparable way.

For both types of influencing variables the transportation chain has to be modelled not only as a connection from port to port but also as a mixed mode transportation chain incipient at an arbitrary starting point to any other geographical position. This view on the transportation system implies a multilevel and multi-scale transportation graph as basic data structure to work with.

In the past various approaches have been investigated to develop a global methodology to compare various transport vehicles in complete transportation scenarios.

The design and assessment of the future STS has to consider not only the sea side but also the land and air part of a global transportation chain.

This approach is used in an intermodal mode to identify the impact of new technologies in shipping on the entire transportation chain. A look at the complete transport process in this way will allow an assessment of economic, ecological and time impact of new shipping technologies.

To optimize the transportation system, the different views of the participating stakeholders, are of major interest. Their “local” views have to be considered, a fact that leads to a differentiation of the global view at least on the level of objectives for the optimization criteria and, in general, the multi-criteria optimization task which will have to be solved. This difference of a point-to-point-transportation on a global level, i.e. from the point of view of freight complicates the approach and has to be discussed as a detailed problem specification.

#### **4. Motorways on the Sea**

The European Union introduced the project Motorways on the Sea including existing or recreated sea based transport chains, door-to-door, on the long range, mid range and short range, with specific focus on freight handling on high frequented, high qualitative and reliable short range seaborne connections. Hence motorways on the sea are intended to absorb the biggest part of the expected truck transportation growth, which require access from the littoral or insular, which require daily chaining between the requested harbours. To achieve this goal chaining between four pre-defined sectors have be conducted, as shown in Figure 1, indicated by the blue lines which interconnect the geographic sectors at the Baltic Sea, West-Europe, South-East-Europe and South-West-Europe. Another goal is the bypass of the Pyrenees and the Alps.



**Fig. 1:** Map of the planned Motorways on the Sea (Map Motorways Sea 2004)

The simulation was accomplished with the BMT turnover simulator „EFM STAN“ (European Freight Model Strategic Transportation Analysis), an interactive graphic transportation planning software, modified and mapped onto the European area. The modification was done based on the data bases available at the Swedish institute for communication analysis (SIKA). These data bases contain detailed information about the transportation demand of the several modalities (ship, road, rail), which are partitioned into different regions, weighted by the respective costs such as

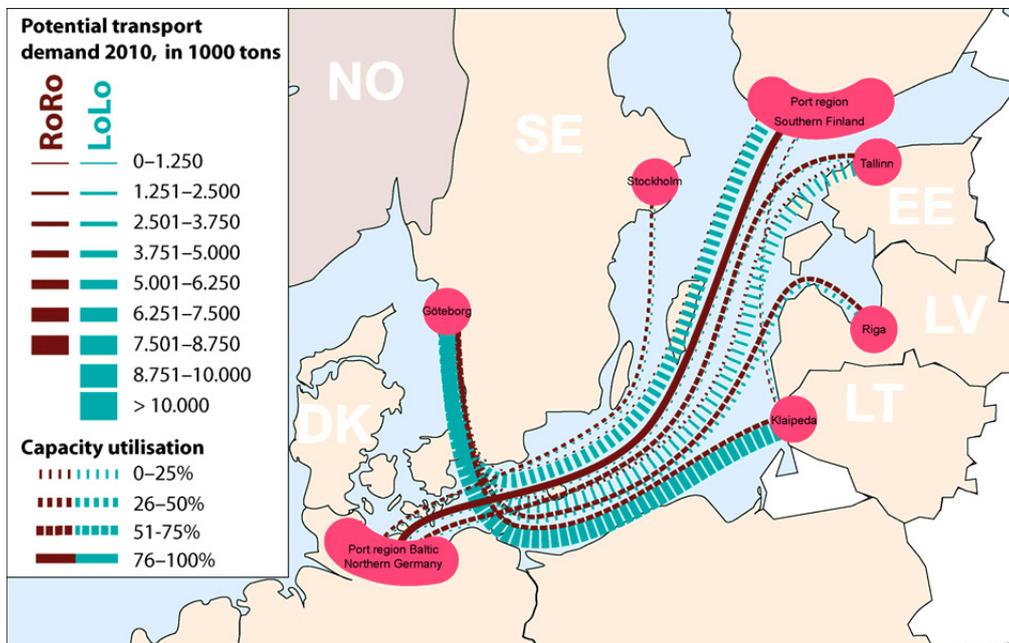
- operative costs,
- qualitative costs,
- bulk oriented costs.

Based on that data the potential impact onto the foregoing mentioned regions can be checked and after that constitutive scenarios can be developed for the respective time frame. For this reason the simulator requires the following input data:

- connections are additional connection in both directions,
- frequency means one departure per harbor per day,
- capacity is based on standardized ship sizes, for RoRo 1800 lane meter and for LoLo 500 TEU,
- length of connection determine the number of ships required,
- velocity of ships and costs not different between the regions,
- each MAV connect two EU-member states; the harbors are at least min. 500 km distant of each other.

The breakdown into ferry transportation (Roll on Roll of) and container transportation (Lift on Lift off) is based on two different matrices. The ferry matrix is based on European inland transportation without bulk cargo, and the container transportation contains the overseas freight transportation with the EU.

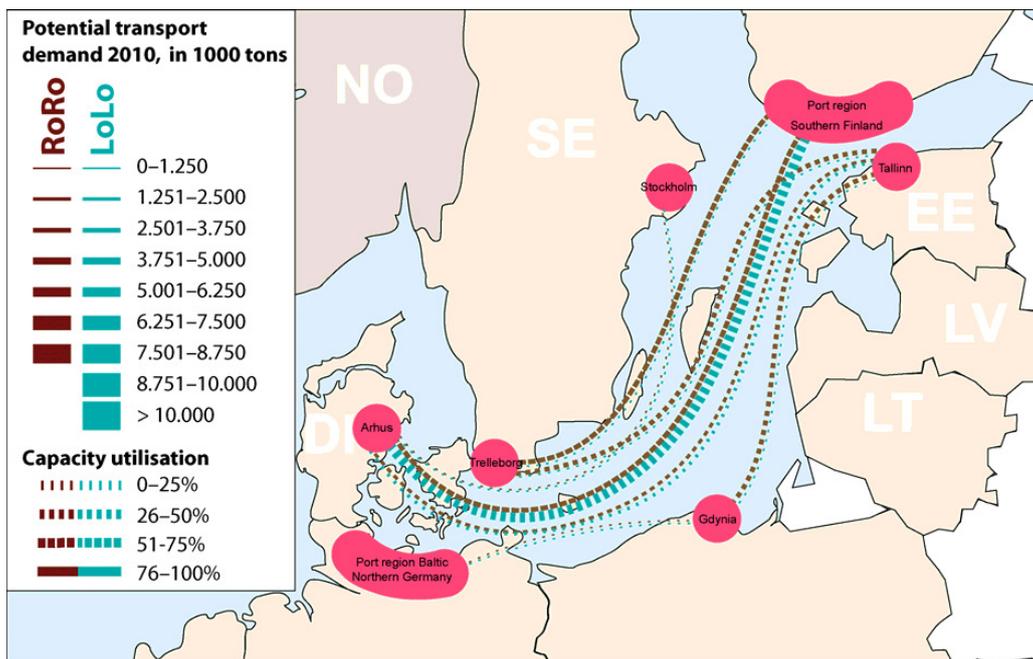
The simulation results for the Baltic sea without consideration of the CO2 impact onto the environment is shown in Figures 2 and 3.



**Fig. 2:** Baltic Sea (Fiedler R et al, 2006)

With regard to truck ferries' (RoRo) it is generally admitted that the high frequented and fully loaded new introduced MOS connections are perform better. Capacity utilization is mostly in between 40 - 65%. Edge cases are the port regions Southern Finland-Baltic Germany with a capacity utilization of 85% as well as the Port Region Baltic Germany – Gdynia with 5%.

The majority of the simulated new connections disburden the increase of transportation from the road onto the sea. Some of the simulated connections accomplish beyond that another goal of the MOS main idea: The strong modal separation through the MOS can in favour increase rail transportation.



**Fig. 3:** Baltic Sea (Fiedler R et al, 2006)

In contrast to RoRo the LoLo results, which means container transportation with feeder ships, require a different interpretation. Only through the feeder ship connection through the big overseas harbors like Göteborg and Aarhus harbors such as Helsinki and the main harbors of the Baltic states Klaipeda, Riga and Tallin can be reached through the introduced new MOS connections.

Taking into account the foregoing mentioned the transportation volume accomplish in the mean an utilization ratio of 30%. Only Göteborg–Klaipeda show an utilization ratio 70%. Crucial for rating the LoLo transport connections ist he understanding of the actual situation. Different to the simulation assumptions in this area the daily harbor connection is not the existing. Because feeder ships cruise once a week the Baltic sea piloting one after another the harbors on this route. Hence this schedule is in competition with the direct harbors connection assumed within the MOS project with the simulated direct connections.

## **5. Conclusion**

As a results of the simulation study it can be stated that transportation volume will increase which will result in a much more evil CO2 balance for the environment. With the MOS concept environmental protective solutions are accomplishable which require more research work in this direction to make the CO2 balance much less evil through MOS.

## **References:**

Fiedler R et al, 2006: Ralf Fiedler, Peter W. Cardebring, Roman Poersch, Detlev Fischer, Desk study on good flows in Europe for a pre-definition of Motorways of the sea (MOS), Hamburg, 2006

# Ein Pipeliningkonzept zur Modellierung der Passagier- und Gepäckbearbeitung am Flughafen

Jochen Wittmann, Kai Himstedt, D.P.F. Möller  
*[wittmann|himstedt|dmoeller]@informatik.uni-hamburg.de*  
*University of Hamburg, Germany*  
Department of Informatics, Vogt-Kölln-Str. 30, 22527 Hamburg

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Spitzenclusterprojektes “Effizienter Flughafen 2030“ geht es darum, sämtliche Prozesse an einem Flughafen, die nicht der Kontrolle der Flugsicherung unterliegen, ganzheitlich abzubilden und zu optimieren. Es handelt sich also im Wesentlichen um die Modellierung der Passagier- und Gepäckströme vom Eingang des Flughafens bis zum Boarden bzw. Beladen sowie alle Aktivitäten, die zur Abfertigung eines Flugfahrzeuges durch die örtlichen Service-Provider notwendig sind (Catering, Tanken, Reinigung, ...) [3]. Besondere Beachtung müssen auch die Modellgrenzen erfahren, an denen einerseits ein Lastmodell für das Passagieraufkommen und andererseits die Flugbewegungen (Starts und Landungen) abzubilden sind.

Die Projektstruktur ist nun derart angelegt, dass die einzelnen Abschnitte der Prozesskette, wie

- Generierung der Passagiere
- Ankunft am Terminal durch Individualverkehr oder öffentliche Verkehrsmittel
- Passagierbewegung innerhalb des Terminals
- Gepäcktransport
- Services auf dem Vorfeld
- Flugbewegungen
- ...

in separaten Arbeitspaketen und von unterschiedlichen Projektpartnern bearbeitet und modelliert werden, um bereits vorhandenes Systemwissen und existierende Teilmodelle nutzen zu können.

Zur Abbildung der gesamten Prozesskette ist folglich eine Modellkopplung notwendig, wobei die bekannten Probleme der unterschiedlichen Skalen und verschiedener Abstraktionsniveaus auftreten.

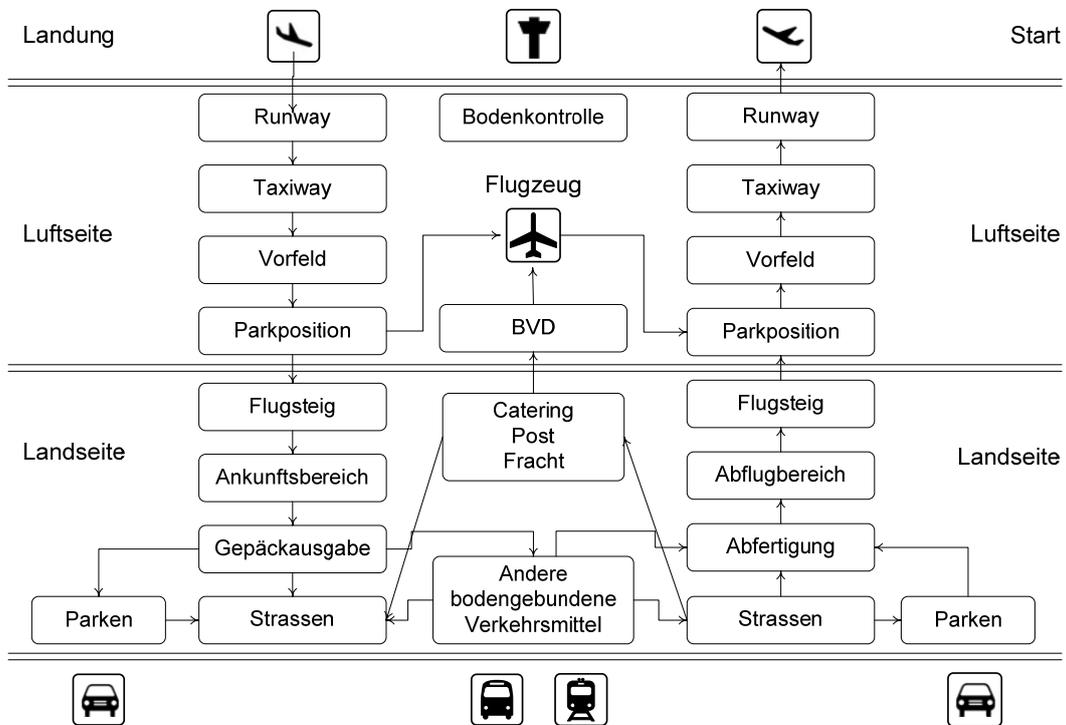
Der Beitrag analysiert zunächst dieses Problemfeld und resultiert in einer Präzisierung der Aufgabenstellung in Form eines integrativen Gesamtmodells für die Flughafenprozesse.

Im nächsten Schritt werden die Schnittstellen zwischen den Teilmodellen definiert, wobei auffällt, dass zur Erreichung der Projektziele die Teilmodelle nicht im Sinne einer engen Rückkopplung genutzt werden, sondern vielmehr als Lastmodell, d.h. als Lieferanten von Inputs für die folgenden Schritte der Prozess- bzw. Modellkette interpretiert werden können. Es handelt sich also um den Spezialfall einer Modell-„Pipeline“, die ohne Rückkopplungen abgearbeitet werden kann. Allerdings beseitigt diese Sicht nicht die

erwähnten Schnittstellenprobleme bzgl. des Auflösungsvermögens der Teilmodelle in deren zeitlicher, räumlicher Dimension sowie bzgl. der Genauigkeit der jeweiligen Werte für die einzelnen Modellgrößen.

Es muss also eine intelligente Kopplung erfolgen (gegebenenfalls durch die Einbindung von Schnittstellenfunktionen und/oder Filtern). Diese Schnittstellen werden diskutiert und spezifiziert, anschließend werden die prinzipiellen Lösungsansätze diskutiert:

- Klassische Modellkopplung
- Kopplung über eigenentwickelten Modellserver
- Teilmodelle im Sinne einer service-orientierten Architektur



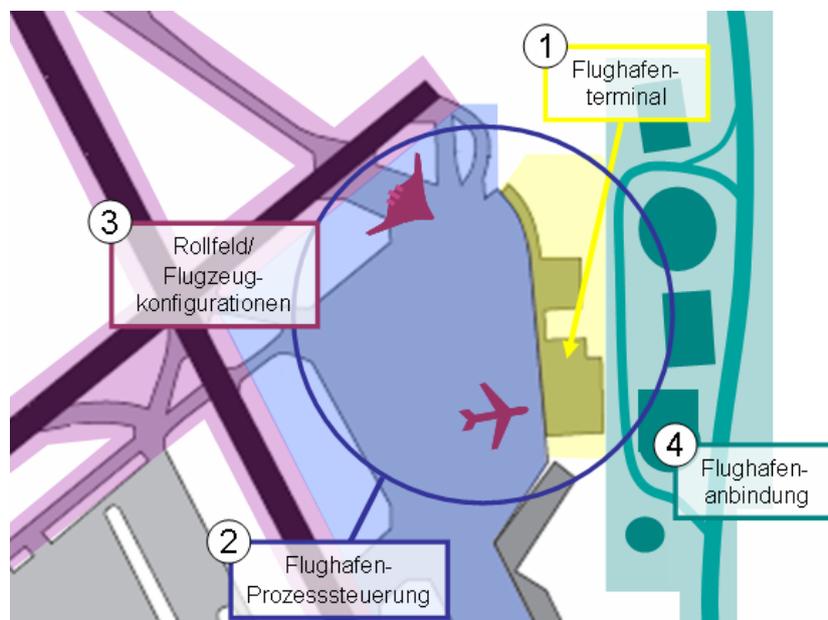
**Bild 1:** Prozessketten am Flughafen (nach [3])

# 1 Prozesse am Flughafen

Das Leuchtturmprojekt „Effizienter Flughafen 2030“ [11] verfolgt einen holistischen Ansatz, der den stark vernetzten Strukturen des Lufttransportsystems und des Flughafens als Teilkomponente Rechnung trägt. Dazu wird zunächst der Flughafen zweckmäßig in Teilaspekte unterteilt, um gezielt Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Einzelaspekten durchzuführen, bevor die gewonnenen Erkenntnisse bzw. entwickelten Prozesse und Technologien in das Gesamtsystem integriert und bewertet werden. Die Unterteilung des Flughafens in Teilaspekte ist wie folgt:

- Flughafenterminal
- Flughafenprozesssteuerung
- Flughafenrollfeld inklusive Flugzeugkonfigurationen
- Flughafenanbindung

Bild 2 zeigt die Unterteilung am Beispiel eines generischen Flughafens. Diese Einteilung ist die Basis der Strukturierung des Leuchtturmprojekts sowie der im Rahmen dieses Projektes zu entwickelnden Teilmodelle. Übergeordnetes Ziel ist es, im Sinne der Szenariotechnik ein Szenario für das Jahr 2030 zu entwickeln, das ausgehend von der Generierung des Passagieraufkommens die Prozesskette von der Wohnungstür des Passagiers bis zur Beendigung des Ground-Handlings inkl. Boarding und Gepäckverladung unter Berücksichtigung der zu erwartenden technischen wie organisatorischen Entwicklung abbildet. Hierzu sollen von den Projektpartnern für die einzelnen Elemente der Prozesskette adäquate Modelle entwickelt, entsprechend gekoppelt und im Sinne der Szenariotechnik ausgewertet werden.



**Bild 2:** Teilsystemzuordnung eines Flughafens

## 2 Zielstellung des Teilprojektes Modellkopplung

Entsprechend der Projektstruktur werden von den einzelnen Arbeitsgruppen die folgenden Teilmodelle erstellt:

### Wohnungstür bis Eingang Flughafen-Terminal

In dieser Arbeitsgruppe geht es einerseits darum, durch individuenbasierte Ansätze ein geeignetes Verkehrserzeugungsmodell (am Beispiel von Hamburg) zu entwickeln und andererseits den derart generierten Verkehr in der Dimension der Region Hamburg auf Fahrten mit privaten Verkehrsmitteln bzw. dem ÖPNV abzubilden.

### Terminal Eingang bis Boarding

Dieser Abschnitt umfasst das Check-In und die anschließend getrennte Verfolgung von Passagieren und Gepäck durch das Terminal bis ins Flugfahrzeug. Dabei sind insbesondere neue Ladetechniken für das Gepäck und neue technologische wie organisatorische Maßnahmen zur Unterstützung der Leittechnik für die Wege im Terminal zu berücksichtigen.

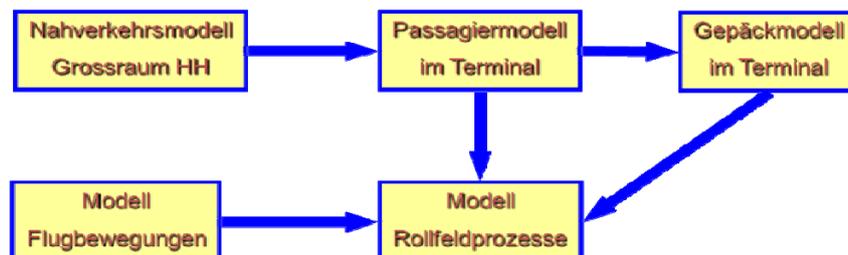
Unabhängig von der Sicht des Passagiers ist dazu auch die Perspektive des Flughafenbetreibers und damit insbesondere die Organisation der Prozesse auf dem Rollfeld zu betrachten.

Es ist offensichtlich, dass sich gerade für dieses Arbeitspaket eine weitere Differenzierung in Sub-Prozesse anbietet. Im Falle des Projektes Airport 2030 sind dies die Teilprozesse Fluggastbewegung, Gepäcktransport, sowie Teilprozesse für die einzelnen Services die zur Abfertigung des Flugfahrzeuges am Rollfeld angeboten werden.

### Rollbewegungen, Starts, Landungen

Ein drittes Teilmodell stellt den eigentlichen Flugverkehr dar und bildet damit die zweite Systemgrenze für die Untersuchung.

Abbildung 3 zeigt die beteiligten Teilprozesse noch einmal im Überblick. Auf der Basis der Teilmodelle, die diesen Teilprozessen zugeordnet sind, können nun Entwicklungen, die für das Jahr 2030 erwartet werden, im Sinne von ein Szenario definierenden Parametern gesetzt werden. Ziel der Auswertung ist eine Gesamtbewertung der Prozesskette, weshalb die Teilmodelle verknüpft und als integriertes Gesamtmodell interpretiert werden müssen.



**Bild 3:** Die zu koppelnden Teilmodelle

### **3 Modellpipeline**

Eine Analyse aus modelltechnischer Sicht resultiert in den folgenden Beobachtungen bezüglich des zu modellierenden Systems:

#### **3.1 Integrative Betrachtung versus Interpretation bei der Szenariotechnik**

Ziel des Projektes soll es nicht sein, ein intermodales Gesamtmodell zu entwickeln, das sämtliche Prozesse in einheitlicher Skala abbildet. Vielmehr ist angestrebt, Nutzen aus dem bereits vorliegenden Know-How der Partner zu ziehen und deren bereits vorliegende Modellansätze inkl. der jeweiligen Laufzeitsysteme zu nutzen. Dies ist möglich, da durch die Verwendung der Szenariotechnik die jeweiligen Varianten zwar mit hoher Detailtreue nachgebildet werden müssen, die Modellergebnisse selbst am Ende aber nur auf einem relativ hohen Abstraktionsniveau interpretiert werden. Die für die Interpretation verwendeten typischen Kennzahlen sind zum Beispiel: Turn-Around-Zeit des Flugfahrzeuges, Passagierzahlen pro Zeiteinheit (wobei hier nach Spitzenzeiten und normalen Betrieb unterschieden wird) oder aber die Menge der zur Abfertigung benötigten Ressourcen (z.B. Fluggastbrücken, Push-Back Fahrzeuge, Wagen und Container für Gepäck, ...).

Aus modellierungstechnischer Sicht ist also eine Menge proprietärer Modelle inklusive Laufzeitsystem gegeben, die bezüglich Modellierungsparadigma, Detailgenauigkeit (insbesondere zeitlichem Auflösungsvermögen) und Implementierung erhebliche Unterschiede aufweisen und in Analogie zur Prozesskette im realen System unter Berücksichtigung des speziellen Modellierungszieles „Szenariotechnik“ in geeigneter Weise gekoppelt werden sollen.

#### **3.2 Informationsfluss zeitlich „vorwärtsorientiert“**

Nun gibt es ja bereits eine Fülle von Literatur über die korrekte Kopplung von Modellen (hier seien nur die Normierungsansätze durch HLA sowie die theoretisch basierten Kopplungsformalisten von Uhrmacher et al. [6] und Eschenbacher [5] angeführt), jedoch ergibt sich für die im Projektkontext vorliegende Aufgabe eine etwas weniger anspruchsvolle Problemspezifikation:

Bei genauerer Betrachtung erkennt man nämlich, dass die Teilmodelle in Form einer Pipeline gekoppelt sind und keine Feedback-Verbindungen aufweisen. Im Wesentlichen kann man in dieser Pipeline das jeweils vor einem Teilmodell angeordnete, zu koppelnde Teilmodell als ein Lastmodell für das aktuell betrachtete Teilmodell interpretieren. In der Pipeline werden also „Last-Ströme“ unterschiedlicher Inhalte (Passagiere, Gepäck, ...) generiert und in ihrer zeitlichen Dynamik an das folgende Glied der Teilmodell-Pipeline weitergegeben. Charakteristisch ist dabei, dass diese Lastströme selbstverständlich Zeitmarken tragen, in der Pipeline allerdings keine Rückflüsse von einem Teilmodell auf vorausliegende Teilmodelle modelliert werden müssen. Bezogen auf die Abarbeitung beziehungsweise die zeitliche Dynamik der Last-Ströme ist auf Grund der ausschließlichen Vorwärtsorientierung folglich eine vollständige Entkopplung zur Laufzeit der Teilmodelle möglich, wenn

- die Schnittstelle erlaubt, die ankommenden Ströme sozusagen „zwischenzupuffern“, wenn das vorausgehende Teilmodell schneller arbeitet als das in der Pipeline folgende und
- das jeweils folgende Modell sich zur Laufzeit gewissermaßen in einen Zustand „wartend“ versetzen kann, wenn die zum benötigten Zeitpunkt anliegende Last durch das vorausgehende Teilmodell noch nicht auf die Schnittstelle gegeben ist.

Die jeweilige Zeitbehandlung in den beteiligten Teilmodellen der Pipeline bleibt davon unberührt.

### **3.3 Relativ geringer Informationsfluss an den Schnittstellen**

Hinzu kommt, dass gerade weil die Teilmodelle der Pipeline als Lastmodelle für die jeweils folgende Komponente interpretiert werden können, die tatsächliche an der Schnittstelle zu übertragende Datenmenge sehr gering ist. Es handelt sich eben im Wesentlichen nur um sehr abstrakte Kennzahlen (Passagieraufkommen pro Zeit, Transportaufträge pro Zeit...), die einfach und ohne größeren implementierungstechnischen Aufwand übermittelt werden können, zumal wie beschrieben, keine vollständige zeitliche Synchronisation notwendig ist, sondern vielmehr nur ein vorwärtsorientiertes Puffern bzw. Warten.

## **4 Diskussion unterschiedlicher Lösungsansätze zur Kopplung von Simulationsmodellen**

Die Grundidee einer Kopplung von Prozessen auf dem Gebiet der Softwaretechnik über eine Pipeline geht schon auf McIlroy zurück und fand eine starke Verbreitung als Thompson sie als „Pipes“ dem Unix Betriebssystem hinzufügte [12]. Die simple und dennoch raffinierte Idee besteht darin, jeweils den seriellen zeichenorientierten Ausgabestrom eines Vorgänger-Prozesses als Eingabestrom für einen Nachfolger-Prozess zu verwenden. An dieser Verkettung können auch mehr als zwei Prozesse beteiligt sein, so dass beispielsweise ein Prozess  $P_2$  für einen Prozess  $P_1$  die Rolle des Nachfolgers und für einen Prozess  $P_3$  die Rolle des Vorgängers annimmt. Die Beschreibung der eigentlichen Pipeline als Kopplung der Prozesse erfolgt dabei mit einfachen Mitteln der Kommandosprache des Betriebssystems.

Bei der Kopplung der Teilmodelle zur Modellierung der Passagier- und Gepäckbearbeitung am Flughafen, für die Rückkopplungen glücklicherweise ausgeschlossen werden können, besteht eine offensichtliche Analogie zu dieser grundlegenden Pipeline-Idee, wobei allerdings die einfachen Mittel des Betriebssystems nicht mehr geeignet erscheinen, um auf dieser Basis die potenziell durchaus komplexeren Pipeline-Strukturen sinnvoll beschreiben zu können.

Die Teilmodelle werden ihre Ergebnisse im allgemeinen auf der Basis einer Simulation (z. B. zur Generierung der prozentualen Verteilung von Passagieren mit bestimmten Eigenschaften, zur Generierung der Ankunftsdaten von Passagieren am

Flughafen unter Berücksichtigung der benutzten Verkehrsmittel etc.) unter Verwendung der entsprechenden Eingabeparameter liefern. Ohne ein zusätzliches Framework bietet das Betriebssystem per se keine Unterstützung zur Beschreibung der Aus- bzw. Eingabedatenstrukturen solcher Teilmodelle und es enthält keinen integrierten Anschluss an ein Simulationssystem. Als besondere Anforderung lässt sich noch herausstellen, dass die einzelnen Modelle – bzw. deren Realisierung als Simulationen – von unterschiedlichen Projektpartnern erstellt und ggf. an unterschiedlichen geographischen Orten zur Verfügung gestellt werden, was für die Bewertung eines Lösungsansatzes zu berücksichtigen ist. Von besonderer Bedeutung ist demnach eine möglichst komfortable Unterstützung bei der Beschreibung eindeutiger Schnittstellen – mit Werkzeugen zur Schnittstellendefinition, zum Schnittstellentest und zur Schnittstellendokumentation – und darüberhinaus die Unterstützung einer verteilten Umgebung bei der Modellkopplung.

#### **4.1 Klassische Modellkopplung**

Seit den 80er Jahren gewinnt die Analyse gekoppelter technischer Systeme bzw. die numerische Lösung der zugehörigen gekoppelten mathematischen Gleichungen zunehmend an Bedeutung. Bei der klassischen Modellkopplung wird die Trennung der Teilsysteme für deren modulare Umsetzung ausgenutzt. Ein besonderes Problem kann bestehen, wenn bei der Kopplung der einzelnen Simulatoren Informationen zum Zeitverhalten der Simulationsschritte ausgetauscht werden müssen und Rückkopplungen in den Modellen möglich sind. SIMPACK [9] ist ein Beispiel für ein kommerzielles Produkt, das die „Synchronisation“ der Zeitschritte gekoppelter Systeme ermöglicht. SIMPACK kann auch mit weiteren Systemen kombiniert werden, etwa mit Dymola (Dynamic Modeling Laboratory) [4], das ein Beispiel für eine sehr mächtige Simulationsumgebung auf Basis der gleichungsbasierten Sprache Modelica zur Beschreibung komplexer physikalischer Systeme ist. Zur Integration mit SIMPACK kann Dymola entsprechenden C-Code exportieren. Arnold und Schierz [1] beschreiben eine solche Kopplung am Beispiel der mechanischen Baugruppen eines Fahrzeugs mit servo-hydraulischer Lenkung.

Für die in diesem Beitrag betrachtete Kopplung der Teilmodelle eines Flughafenbetriebs ist aufgrund der nicht erforderlichen Rückkopplung ein Austausch von Information über Zeitschritte nicht wirklich erforderlich. Vor diesem Hintergrund scheint ein Lösungsansatz mit einer klassischen Modellkopplung weniger geeignet, weil zum einen ihr Schwerpunkt der besonderen Berücksichtigung des Zeitverhaltens nicht ausgenutzt werden kann und zum anderen die Unterstützung einer verteilten Umgebung, d. h. die Kopplung von Simulatoren an verschiedenen Orten, wiederum nicht zu den Schwerpunkten der klassischen Modellkopplung zählt. Neben dem Problem möglicherweise hoher Lizenzkosten für den Einsatz kommerzieller Produkte kommt noch hinzu, dass die Festlegung auf ein bestimmtes Simulationsprodukt in gewisser Weise auch die Freiheit der verschiedenen Projektpartner bei der Wahl ihrer bevorzugten bzw. für ihr Teilmodell am besten geeigneten Simulationsumgebung unnötig einschränken würde. Dazu kommt noch, dass bereits existierende Modellierungen bzw. Simulationen ggf. in eine neue Umgebung zu portieren wären.

## 4.2 Kopplung mehrerer Modellserver

In [2] werden verschiedene Möglichkeiten der Einbindung von Simulationsmodellen in computergestützte Lernumgebungen evaluiert und am Beispiel der Simulation „Oxsoft Heart“ wird insbesondere die erfolgreiche Einbindung auf der Basis einer Client-Server-Architektur vorgestellt. Die Anwendung „Oxsoft Heart“, mit der sich elektrophysiologische Vorgänge an Säugetierherzen simulieren lassen, ist dabei selbst vollkommen unverändert und lediglich in einen zentral laufenden Modellserver eingebettet. Der Modellserver kapselt die Simulation und stellt einem Client (Java-Applet) die vollständige Steuerung der Simulation als Dienst zur Verfügung. Mehrere Clients können dabei die „Oxsoft Heart“-Simulation – mit jeweils eigenen Parametern – auch gleichzeitig ausführen, wozu der Modellserver für jeden Client eine eigene Simulations-Instanz startet. Das Framework des dienstbasierten Grundkonzept sieht im Sinne einer Mittelschichtarchitektur weiterhin vor, quasi beliebige Simulationen auf die gleiche Weise zusätzlich einzubetten, sofern sich die einzubettenden Simulationen von außen steuern lassen (z. B. über eine Dateischnittstelle oder über Parameter, die der Simulationsanwendung beim Aufruf mitgegeben werden können).

Während in [2] ein einziger zentraler Modellserver genügt, um mehrere Clients zu bedienen, ist es nun ohne weiteres denkbar, bei jedem Projektpartner eine eigene Modellserver-Instanz zu starten und so die Funktionalität der jeweiligen Teilmodelle einzubetten. Mit einer weiteren (zentralen) Komponente zur Beschreibung der Verkettung der an den verschiedenen Orten von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Simulationsdienste wäre ein Lösungsansatz gefunden, der bereits wesentliche Anforderungen, wie die Unterstützung einer verteilten heterogenen Umgebung und die Umsetzung einer klar definierten Schnittstelle zur Simulationsteuerung, erfüllt. Der proprietäre Charakter des Modellserver-Konzepts, der sich insbesondere mit der notwendigen Unterstützung einiger spezieller multimedialer Fähigkeiten für die Verwendung in einer computergestützten Lernumgebung begründen lässt, erschwert allerdings den Einsatz von inzwischen typischen leistungsfähigen Entwicklungswerkzeugen, die auf verbreiteten Standards – wie zum Beispiel den Standards der XML-Welt und insbesondere der XML-Sprachfamilie – basieren.

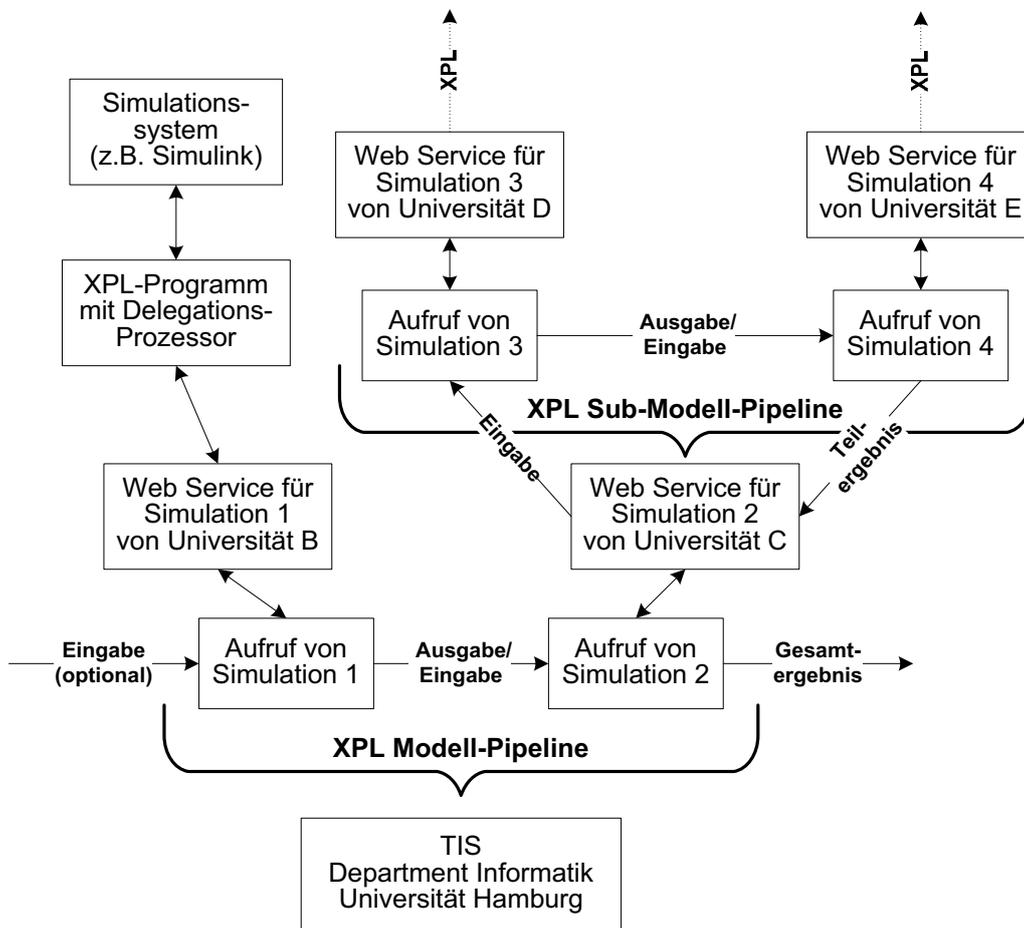
## 4.3 Kopplung der Modelle auf der Basis von XML-Pipelines und der Umsetzung einer service-orientierten Architektur

Die XML-Welt bildet heute den de facto Standard als Rahmen für den Austausch von strukturierten Daten in heterogenen Umgebungen. Mit dem Vorschlag der XML Pipeline Language (XPL) haben Bruchez und Vernet als „W3C Member Submission“ [15] einen Rahmen geschaffen, mit dem sich Pipeline-Strukturen auf besonders komfortable Weise als so genannte XPL-Programme schreiben lassen. XPL-Programme sind dabei zunächst selbst wohlgeformte XML-Dokumente, womit ihre syntaktisch korrekte Erstellung von entsprechenden XML-Editoren unterstützt wird. Ein XPL-Programm enthält im Wesentlichen eine orchestrierte Folge von Operationen auf so genannten XML Information Sets. Die eigentlichen Operationen zur Transformation der Daten werden von XML-Prozessoren gekapselt. Am Beispiel der Orbeon Forms Plattform [4], die mit XPL

als einer Kernkomponente die Pipeline-Metapher verwendet, soll nachfolgend ein Lösungsansatz zur Modellkopplung aufgezeigt werden. Die leistungsfähige und quelloffene Orbeon Forms Plattform dient im Allgemeinen zur Realisierung von W3C-XForms [14] basierten Oberflächen (zum Beispiel für die Abbildung eines Workflows mit Erfassungsmasken) für Standard-Internet-Browser.

Für die Orbeon Forms Plattform gibt es bereits eine Reihe vorgefertigter Transformationsprozessoren für Standardaufgaben, wie z. B. Konverter-Prozessoren (um XML-Dokumentstrukturen in andere Formate zu überführen) oder Datenbank-Prozessoren (um z. B. auf SQL- oder XML-Datenbanken zuzugreifen). Weiterhin gibt es so genannte Delegations-Prozessoren, um Dienste anderer (entfernter) Systeme aufrufen zu können, die z. B. als Web Services [13] implementiert sein können. Mit entsprechender Schnittstellendefinition sind Web Services potenziell geeignet, um die Ansteuerung der Simulationsmodelle der verschiedenen Projektpartner zu beschreiben. Die eigentliche Anwendungsfunktionalität und technische Realisierung der Web Services ist damit allerdings noch nicht näher beschrieben. Ein Projektpartner hätte demnach zunächst die Option, mit einer beliebigen proprietären Implementierung sein Simulationsmodell mit einer – dennoch – klar definierten Web Services-Schnittstelle anzubieten. Besonders attraktiv wird die Orbeon Forms Plattform als Basis eines Lösungsansatzes zur Modellkopplung jetzt noch dadurch, dass in der Orbeon Forms Umgebung Web Services wiederum leicht als XML-Pipelines mit XPL realisiert werden können und auch der Anschluss an Java bzw. die Umsetzung eigener Prozessoren (durch Ableitung von einer „SimpleProcessor“-Klasse) vorbereitet ist. Ähnlich wie bei der Einbindung der „Oxsoft Heart“-Simulation mit dem Modellserver aus dem vorigen Abschnitt, bietet sich hier eine Möglichkeit zur Anbindung quasi beliebiger Simulationssysteme, z. B. Simulink [10], das sich schon zuvor mit Java an den Modellserver aus [2] anbinden ließ [8].

Der hier vorgestellte Lösungsansatz zur Modellkopplung unter Verwendung von XPL-Pipelines zum orchestrierten Aufruf von Web Services im Sinne einer service-orientierten Architektur scheint dem Lösungsansatz der Verwendung mehrerer Modellserver aus dem vorigen Abschnitt noch überlegen zu sein. Er enthält bereits die dort noch fehlende Komponente zur Beschreibung der Verkettung der Simulationsdienste und basiert mit der XML-Welt auf weit verbreiteten und besonders gut unterstützten Standards. In Abbildung 4 ist die Systemarchitektur dargestellt.



**Bild 4:** Architektur der Modellkopplung mit XML-Pipelines und Web Services

In der Abbildung übernimmt der Arbeitsbereich Technische Informatiksysteme (TIS) des Departments Informatik der Universität Hamburg eine zentrale Rolle als Koordinator zur Verkettung von zwei Teilmodellen, die in dem Beispiel von den Universitäten B und C als Web Services zur Verfügung gestellt werden. Dadurch, dass XPL-Programme Web Services aufrufen können und Web Services wiederum mit XPL-Programmen realisiert werden können, ergibt sich natürlich implizit das Potenzial auch baumartige Modellkopplungen elegant zu beschreiben. In der Abbildung ist das für die Universität C dargestellt, die zur Realisierung des eigenen Teilmodells die verketteten (Unter-) Teilmodelle der Universitäten D und E verwendet.

## 5 Literatur

- [1] *Arnold, M., Schierz, T.*: Effizienz und Robustheit numerischer Kopplungsalgorithmen im MODELISAR Co-Simulation-Interface. In: G. Elst (Hrsg.). Tagungsband ASIM STS/GMMS 2009 und DASS 2009, Dresden (2009).
- [2] *Bach, M., Himstedt, K., Wittmann, J.*: Einbindung von Simulationen in computer-gestützte Lernumgebungen auf der Basis einer Client/Server-Architektur. In: Jochen Wittmann, Dimitris K. Maretis (Hrsg.). Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften. Workshop Osnabrück 2003. Shaker Verlag. Aachen (2003), S. 109-128.
- [3] *Daenzer, W.F.; Huber, F.* (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis, Verlag Industrielle Organisation Zürich, Zürich 2002
- [4] *Dymola*: Dynamic Modeling Laboratory. <http://www.dynasim.se>
- [5] *Eschenbacher, P.*: Entwurf und Implementierung einer formalen Sprache zur Beschreibung dynamischer Modelle, Dissertation am Institut für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung; 1989, erschienen bei: Arbeitsberichte Band 23 Nummer 1, ISSN 0344-3515
- [6] *Himmelpach J, Ewald R, and Uhrmacher L.*: [Parallel and distributed simulation of Parallel DEVS models](#). In *Leye S, and Uhrmacher L.*: Proceedings of the SpringSim '07, DEVS Integrative M&S Symposium, pp. 249-256, SCS.
- [7] *Orbeon*: Orbeon Forms Plattform. <http://www.orbeon.com>
- [8] *Rohwer, J.*: Konzeption und Implementierung eines Modellservers zum browser-basierten Zugriff auf Simulationsmodelle. Diplomarbeit. Arbeitsbereich Technische Informatiksysteme (TIS) am Department Informatik der Universität Hamburg (2004).
- [9] *SIMPACK*: Multi-Body Simulation Software. <http://www.simpack.com>
- [10] *Simulink*: Simulation und Model-Based Design. <http://www.mathworks.de/products/simulink>
- [11] *Spitzencluster Hamburg*: <http://luftfahrtstandort-hamburg.de/index.php?id=576> , Stand 25.08.09
- [12] *The Linux Information Project*: Pipes: A Brief Introduction. <http://www.linfo.org/pipe.html>
- [13] *W3C*: Web Services Activity. <http://www.w3.org/2002/ws>
- [14] *W3C*: XForms 1.1. <http://www.w3.org/TR/xforms11>
- [15] *W3C*: XML Pipeline Language (XPL) Version 1.0 (Draft). <http://www.w3.org/Submission/xpl>

# **MoreSpace – Ein mehrfach-hybrider Ansatz zur Simulation der Raumauslastung von Großgebäuden**

Š. Emrich <sup>1)</sup>, S. Tauböck <sup>2)</sup>, S. Mesić <sup>1)</sup>, F. Breitenecker<sup>2)</sup>, D. Wiegand <sup>1)</sup> und N. Popper <sup>3)</sup>  
stefan.emrich@tuwien.ac.at

<sup>1)</sup> TU Wien, Institut für Städtebau, Landschaftsarchitektur und Entwerfen  
Fachbereich Projektentwicklung und –management  
Gusshausstrasse 30 / A-1040 Wien

<sup>2)</sup> TU Wien, Institut für Analysis und Scientific Computing,  
Forschungsgruppe Mathematische Modellbildung und Simulation  
Wiedner Hauptstrasse 8-10 / A-1040 Wien

<sup>3)</sup> DWH Simulation Services,  
Neustiftgasse 57-59 / A-1040 Wien

## **Kurzfassung**

Das interdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsprojekt MoreSpace ist eine Kooperation der Fachbereiche „Projektentwicklung und Projektmanagement“ und „Mathematical Modelling and Simulation“ an der TU Wien. Es wurde ursprünglich speziell für den TU Umbau, genauer, für den optimierten Umgang mit den sich daraus ergebenden Engpässe bei den Raumressourcen, konzipiert. Durch den verwendeten Ansatz der automatisierten, datenbankbasierten Modellgenerierung ist das Werkzeug jedoch extrem flexibel und kann somit für die Simulation beliebiger Großgebäude eingesetzt werden – die notwendigen Input-Daten vorausgesetzt.

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Simulationstool ist durch Einbindung von Methoden beider Fachbereiche ein mehrfach-hybrides. Dabei kommen etwa Discrete Event Simulation (DEVS) mit agentenbasiertem Ansatz, Business Process Modeling (BPM), zelluläre Automaten (CA), datenbankgetriebene Modellgenerierung, sowie Flächenmanagement-Techniken zum Einsatz. Die Koppelung der Methoden sowie erste (Zwischen-) Ergebnisse und deren Interpretation sind Gegenstand dieses Papers.

Der MoreSpace-Ansatz erlaubt jedoch nicht nur die Simulation von im Umbau befindlichen Gebäuden, sondern ermöglicht es auch potentielle Gebäude auf die Vereinbarkeit mit der (geplanten) Nutzung zu testen. Was bedeutet, dass geplante Gebäude bereits im Vorhinein für Ihre Nutzung optimiert werden können. Dies wiederum führt direkt zu ökonomischeren Neubauten, bzw. zu einer besseren Auslastung bestehender Gebäude und somit einem verbesserten ökologischen Fußabdruck pro Nutzungseinheit.

## **1 Problemstellung TU Umbau**

Im Zuge des Projektes „Univercity2015“ wird die TU Wien bis zu ihrem 200-jährigen Jubiläum generalsaniert, reorganisiert und –strukturiert. Dadurch soll einerseits die vor-

handene Infrastruktur verbessert und andererseits die – vor allem in der innerstädtischen Lage – beschränkte Ressource „Raum“ optimal genutzt werden.

Da dieser Umbau nur parallel zum laufenden Betrieb stattfinden kann, ergeben sich zwangsläufig Schwierigkeiten durch Bauarbeiten und damit verbunden Einschränkungen. Dazu kommt die Dimension des betrachteten Systems: An der TU Wien arbeiten mehr als 2000 Mitarbeiter und studieren ca. 15.000 Studenten an Standorten die über dem gesamten vierten Wiener Gemeindebezirk (und darüber hinaus) verstreut sind. Aufgrund dieser Komplexität wurde der Umbau vom Rektor der TU Wien mit dem Versuch einen Autoreifen bei voller Fahrt zu wechseln verglichen (bei TU interner Vorstellung von University2015 am 14. Oktober 2008).

Dem Wissensstand der Autoren zufolge existieren für die Bewältigung solcher Problemstellungen bisher keine (allgemein) brauchbaren Werkzeuge. Daher wurde, um den störenden Einfluss des Umbaus auf den (Lehr-) Betrieb minimal zu halten, das Projekt „MoreSpace“ ins Leben gerufen. Wobei das primäre Ziel sich jedoch nicht auf die Minimierung der Einschränkungen direkt richtet, sondern, durch Simulationen und Tests mit verschiedenen Flächenmanagementoptionen, auf die Auslastungsoptimierung der verbleibenden Raumressourcen. Dazu ist notwendig, dass der erforderlichen Modellflexibilität Rechnung getragen wird; etwa um auf die Änderungen des Realsystems (z.B. umbaubedingte Raumperrungen) zu reagieren.

Dies wird hauptsächlich durch die datenbankbasierte Modellgenerierung erreicht, welche den weiteren Vorteil hat, dass dadurch der Einsatz des entwickelten Modells nicht auf die TU Wien beschränkt ist, sondern (mit gewissen Modifikationen) für allgemeine Großgebäude möglich ist.

Insgesamt ergibt sich durch die erwähnten Punkte – als zusätzliches Feature der Software – die Fähigkeit in der Planungsphase von Gebäuden bereits deren Nutzung simulieren zu können. Somit werden für die Planung völlig neue Spielräume eröffnet, als nun die Möglichkeit erwächst, die Pläne mit den gestellten Anforderungen zu vergleichen: Wenn das Werkzeug die in Zukunft notwendigen Ressourcen ermitteln kann, so ist es im Umkehrschluss auch möglich die Pläne entsprechend der benötigten Ressourcen auszulegen.

## **2 Die verwendeten und kombinierten Methoden ...**

Bei MoreSpace handelt es sich, wie bereits eingangs erwähnt, um ein interdisziplinäres Forschungs- und Entwicklungsprojekt. Im Projekt – und vor allem auch im entwickelten Simulationswerkzeug – werden also Methoden beider Fachrichtungen eingesetzt und kombiniert. Wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, existieren für das vorliegende Problem keine Standardlösungen – das Projekt MoreSpace betritt also simulationstechnisches Neuland im Bereich des Facility Management (FM). Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich das FM erst seit 1979 als eigenständige Disziplin entwickelt hat (Nävy 2000) und in ihr zurzeit kaum über simple Tabellenkalkulation hinausgehende Modelle zum Einsatz kommen.

Erfahrungen aus einem der wenigen bisherigen FM-Modelle (discreteFD an der ETH Zürich) haben gezeigt, dass das Verhalten des Flächenmanagements und mögliches „Verhalten“ der Räume, z.B. Teil- und Zusammenlegbarkeit, entscheidend für die Effi-

zienz der Raumnutzung sind. Im diesem Projekt konnten gegenüber den ursprünglichen Annahmen Flächenreduktionen von 40% erzielt werden (Wiegand et al. 2007).

Für das MoreSpace-Tool bildet Discrete Event Simulation (DEVS) den Rahmen. Während DEVS ab den Fünfzigerjahren des vorigen Jahrhunderts (Nance 1993) in Produktion und Logistik, der Kommunikationstechnik, im Supply Chain Management, oder auch im Krankenhausmanagement zum Standard wurden, findet es im FM, wie bereits erwähnt, noch keine Anwendung. Es war daher notwendig die Definition des Entity-Flow Konzeptes für den Einsatz in MoreSpace zu adaptieren: Während die Ressourcen eindeutig als zur Verfügung stehende Räume identifiziert werden können, sind für Entities verschiedene Ansätze möglich (Studenten, Buchungsanfragen, Lehrveranstaltungen, Nutzergruppen, etc.).

Im Prinzip ist es jedoch ein Raumbedarf, welcher die Ressourcen für bestimmte Aufgaben reserviert. Dieser Bedarf kann wiederum mit einer bestimmten Arbeit, an der z.B. Personengruppen beteiligt sind, identifiziert werden, oder umgekehrt mit Personengruppen, die im Raum eine bestimmte Aufgabe erledigen wollen. Im Anwendungsfall des TU Umbaus wurden die Lehrveranstaltungen (LVA) mit der Raumnutzung gleich gesetzt. Um dem Manko zu begegnen, dass eine LVA zwar einen Raum „besetzt“, diese allerdings nicht zwangsläufig (von Studenten) besucht werden muss – der Raum also leer bleiben würde – müssen die Studenten zusätzlich abgebildet werden.

Dies wurde durch einen agentenbasierten Ansatz erreicht. Hierbei wird die statistisch erfasste Studentenstruktur entsprechend den Studienrichtungen, (Pflicht-) Lehrveranstaltungen, Freifächern, etc. im Modell realisiert. In der Simulation werden also eindeutige Agenten generiert, welche versuchen die gegebenen (individuellen) Steuerungspläne (Stundenplänen) abzuarbeiten. Da es nicht möglich ist mehrere LVA gleichzeitig zu besuchen kann es nun vorkommen, dass LVA Räume reservieren, diese aber nicht besucht werden, also die Ressourcen blockiert sind aber leer stehen.

Entscheidend für ein schnell und einfach adaptierbares Modell ist die datenbankbasierte Modellgenerierung. So werden im Softwaretool die Hörsäle und LVA nicht per Hand angelegt und verändert, sondern aus Datenbanken automatisch in Enterprise Dynamics erstellt. Dies erlaubt rasch auf Änderungen (z.B. der Hörsaalstruktur durch Raumsperren oder der LVA durch Studienplanänderungen) zu reagieren.

Die Flächenmanagementoptionen, welche das Systemverhalten steuern, werden in dieses DEVS-Framework gebettet. Sie beeinflussen hauptsächlich wie die Ressourcen verteilt werden (also die Zuweisung LVA zu Raum) bzw. ob und wann Räume zusammengeschlossen oder durch Trennwände zerteilt werden.

Zur Realisierung dieser Kombination von DEVS und Flächenmanagement, sind weitere, unterstützende Methoden notwendig: Dies sind erstens Business Process Modelle (BPM) und zweitens zelluläre Automaten (CA vom englischen „cellular automata“). Für die BPM wurde ursprünglich auf die Business Process Modelling Notation (BPMN) zurückgegriffen, im weiteren Projektverlauf wurde selbige jedoch leicht modifiziert.

Die BPMN wurde speziell zur Systemanalyse und interdisziplinären Kommunikation in Form gut lesbarer Diagramme (White 2004) von IBM entwickelt. Die Notation soll allen Projektbeteiligten – von den Analysten, über die mit der technischen Umsetzung betrauten Mitarbeiter, bis hin zu den involvierten Wirtschaftsfachkräften – das Verständnis der Geschäftsprozesse erleichtern und ermöglichen (Wolter & Schaad 2007).

Zellulären Automaten (CA) sind, ähnlich wie auch die DEVS, ein bewährtes Modellierungswerkzeug, mit Ursprüngen welche um die Hälfte des vorigen Jahrhunderts herum liegen. Ihre Modellbildungsgrundlage ist, wie der Name bereits nahelegt, die einzelne Zelle. CA zählen zu den bottom-up Modellierungsansätzen. Trotz unzähliger (i.d. Regel anwendungsabhängiger) Variationen an CA, kann ein kleinster gemeinsame Nenner gefunden werden: Zelluläre Automaten sind in der Lage extrem komplexe Systeme abzubilden, dies jedoch bei gleichzeitig äußerst einfacher Beschreibung, bzw. auf Computersysteme übertragen, äußerst einfacher und ressourcenschonender Programmierung; bedingt durch ihren Aufbau liegt ihnen eine räumliche Struktur zugrunde (Wolf Gladrow 2000, Emrich 2007). Zusammen mit Elementen der agentenbasierten Programmierung eröffnen CA ein riesiges Anwendungsfeld zur Simulation, darunter die Modellierung von unabhängigen Individuen in räumlichen Systemen.

Für MoreSpace wurden CA verwendet um Wegezeiten der Agenten beim Wechsel von Räumen individuell abbilden zu können. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund eines räumlich (weit) verteilten Standortes notwendig um realitätsnahe Auslastungen der Räume ermitteln zu können.

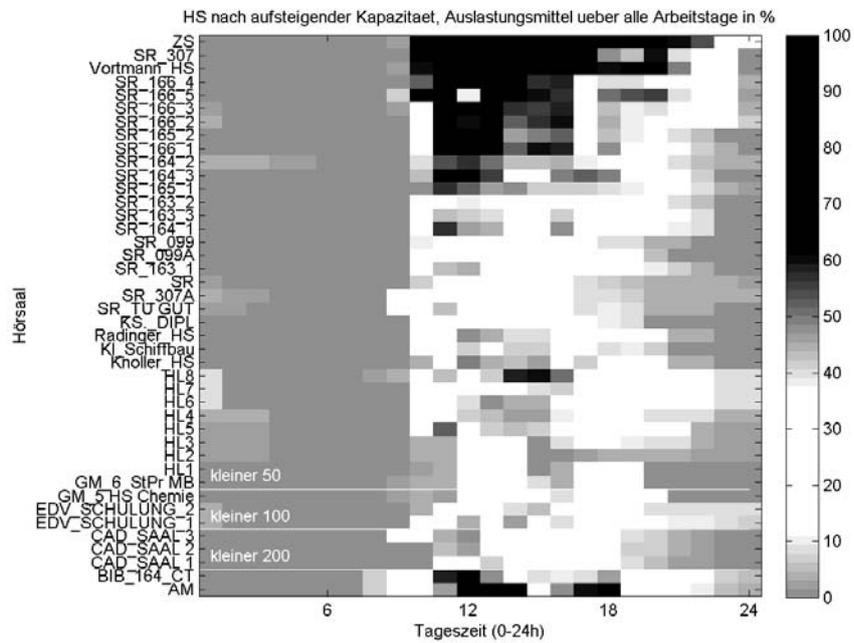
### **3 ... und dadurch gewonnene Erkenntnisse**

Obwohl das Projekt zum Zeitpunkt der Einreichung des Full Paper noch nicht abgeschlossen ist, erscheinen die bisherigen Resultate und Einsichten vielversprechend. Zwar steht auch die abschließende Verifikation und Validierung (V & V) noch aus, die Ergebnisse sind also mit Vorsicht zu lesen, angelehnt an Wenzel et al. (2008) wurde aber parallel zur Entwicklung die V & V der Sub- und Teilmodelle sowie der neu entwickelten Algorithmen betrieben, wodurch gewisse Sicherheit gewährleistet ist.

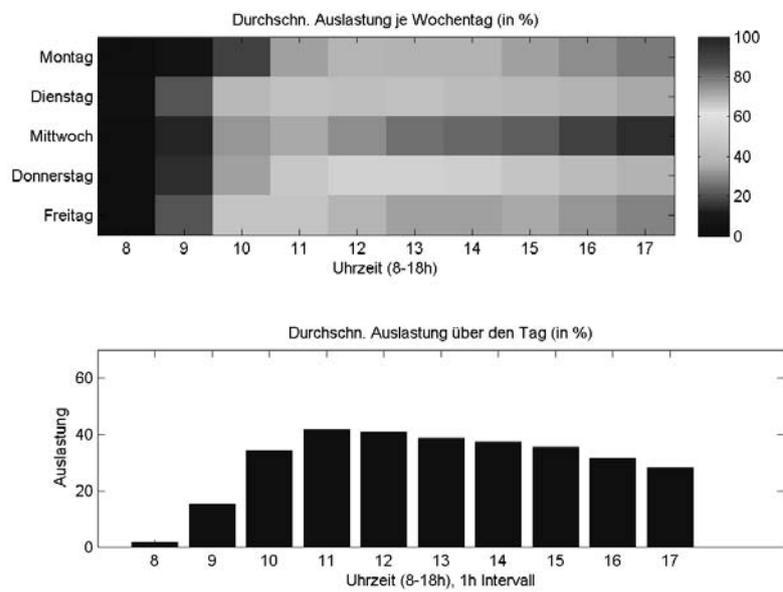
Zusätzlich zu den Rechenergebnissen und deren Interpretation ermöglichte das Projekt MoreSpace ein tiefergehendes Systemverständnis der Buchungsprozeduren an der TU Wien. Dazu zählt zum Beispiel die Entdeckung (und Behebung) eines Bugs in der LVA-Datenbank, welcher LVA und ihre Raumbuchungen automatisch für die folgenden Semester weiterschrieb – unabhängig ob die LVA tatsächlich abgehalten wurde.

Eine weitere systemimmanente Eigenheit wurde z.B. bei gewissen LVA der Architektur (Entwerfen) festgestellt. Diese benötigen am Semesterbeginn und –ende Hörsäle für alle Studierenden (Vergabe und Auswertung der Aufgabenstellungen). Unter dem Semester wird jedoch in Kleingruppen gearbeitet – mit entsprechendem Hörsaalbedarf. Im Modell werden solche Schwankungen berücksichtigt, wodurch optimierte Räume zur Verfügung gestellt und Ressourcen nicht unnötig belegt werden.

Für die Bewertung der Ergebnisse stehen zwei Messgrößen zur Verfügung: erstens die Auslastung der Hörsäle (siehe z.B. Bild 1) und zweitens die Anzahl der Fehlbuchungen (s. Bild 3). Als Fehlbuchung werden jene LVA-Termine bezeichnet, denen kein Raum zugewiesen werden kann. Die Raumauslastung dient dabei eher dazu Verbesserungspotential, bzw. Engpässe (in Kategorie, Uhrzeit, Tagesverlauf, Kapazität, o. ä.) aufzuzeigen, während die Fehlbuchungen primär für die Beurteilung des Gesamtergebnisses dienen. Für ein umfassendes Verständnis ist jedoch die gemeinsame Betrachtung notwendig.

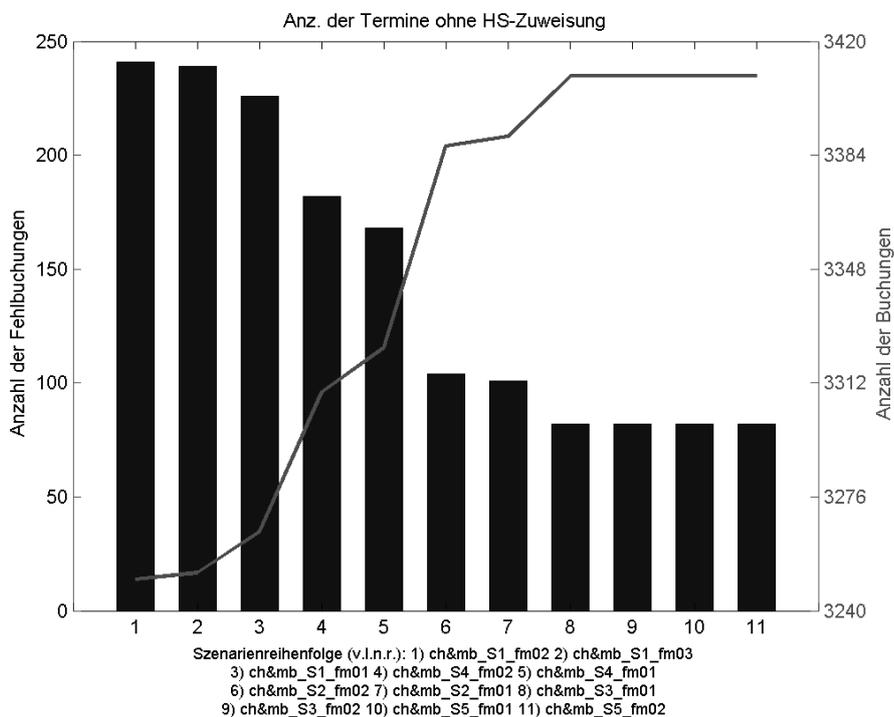


**Bild 1:** Auslastung der Hörsäle im Tagesverlauf gemittelt über ein Semester (x-Achse: Uhrzeit; y-Achse: Hörsäle nach aufsteigender Kapazität von oben nach unten).



**Bild 2:** Unregelmäßige zeitliche Hörsaalnutzung gemittelt über ein Semester (oben: Durchschnittliche Auslastung nach Zeit & Wochentag unten: Zeit über alle Arbeitstage gemittelt).

So konnte durch die Auswertung der Raumauslastung festgestellt werden, dass die größten Engpässe bei Räumen mit Hörerkapazitäten von 200+ auftreten, diese Räume andererseits nur 30% der Kernzeit (8:00 - 18:00) ausgelastet sind. Das bedeutet also, dass es durch zeitgleiche Buchungsanfragen zur Ressourcenknappheit kommt. Als Problemlösung bieten sich unterschiedliche Strategien an. Einerseits der Einsatz flexibler Räume (durch Trennwände). Diese Strategie ist besonders durch oben angesprochene Schwankungen von LVA im Semesterverlauf interessant. Eine zweite Strategie ist die Berücksichtigung dieser Ergebnisse bei der Umbauplanung der Hörsäle. Als dritte Lösung bietet ein einfaches zeitliches Re-Scheduling der LVA deutliches Verbesserungspotenzial (siehe Bild 1 und 2).



**Bild 3:** Einfluss des Flächenmanagements auf Anzahl der Fehlbuchungen (Balken: Anzahl der Fehlbuchungen; Linie: Anz. Befriedigter Buchungsanfragen).

Wie zu Projektbeginn vermutet, ist die Wahl der Flächenmanagements eine sehr Wesentliche. So ist es möglich durch das Flächenmanagement ohne zusätzliche Maßnahmen (etwa zeitliches Re-Scheduling) die Anzahl der Fehlbuchungen um mehr als 50% zu senken! In den Szenarien aus Bild 3 geschieht dies durch Variation der Abarbeitungsreihenfolge der Buchungsanfragen, gekoppelt mit variierenden Hörsaalgrößen (Einsatz von Trennwänden).

Der Grund dafür, dass es innerhalb der letzten vier Szenarien zu keiner weiteren Reduktion der Fehlbuchungen kommt kann entweder in einer tatsächlich erreichten maxima-

len Auslastung (zumindest der betroffenen Hörsalkategorie & -kapazitäten) liegen, wahrscheinlicher aber daran, dass in gewissen Kategorien bzw. Kapazitäten zeitgleich mehr Buchungsanfragen als Räume bestehen. Eine weitere Verbesserung ist in letzterem Fall über das angesprochene Re-Scheduling möglich.

Durch den datenbankbasierten Modellansatz kann das Simulationswerkzeug mit verhältnismäßig geringem Aufwand für den Einsatz an anderen Großgebäuden adaptieren werden. Diesbezügliche Ergebnisse sind leider noch nicht vorhanden; die größte Hürde für die Simulation eines anderen Gebäudes liegt in der Akquise der für das Modell notwendigen Inputdaten.

## 4 Conclusio

Im Projekt MoreSpace wurde mit der Raumauslastungssimulation durch DEVS eine bislang im Facility- bzw. Flächenmanagement, nicht oder nur kaum genutzte Optimierungstechnik adaptiert. Dies wurde erst durch eine interdisziplinäre Kooperation und das damit einhergehende ganzheitliche Systemverständnis möglich. Im FM ist Modellbildung & Simulation zwar noch sehr neu, jedoch zeichnet sich ein sehr großes Anwendungspotential ab. Vor allem für die Bewirtschaftung von Großgebäuden, vor dem Hintergrund steigender Immobilienpreise und einem verantwortungsbewussten Umgang mit Ressourcen, wird dieser Einsatz in Zukunft verstärkt notwendig sein.

Wenngleich die gewonnenen Ergebnisse bis jetzt nur vorläufig sind, zeigen sie doch, dass der Weg erfolgversprechend ist. So kann die Anzahl an Fehlbuchungen durch geeignete Wahl des Flächenmanagements um mehr als 50% gesenkt werden.

Durch die äquivalenten Anforderungen können mit dem entwickelte Modell sowohl Raumsperungen während Umbauarbeiten optimiert, als auch (für bestehende Gebäude) Flächenmanagementoptionen auf ihre Güte getestet und schließlich Neubaupläne mit der Gebäudenutzung verglichen werden. MoreSpace liefert somit in jedem der drei Anwendungsmöglichkeiten einen Beitrag zur Verbesserung der Ökoeffizienz von Gebäuden.

Aufgrund des flexiblen (und dadurch einfach adaptierbaren) Modellaufbaues, ist der logische nächste Schritt für MoreSpace die Ausweitung der Anwendbarkeit des Simulationsmodells auf allgemeine Großgebäude.

## 5 Literatur

- [1] *Emrich, Š.*: Comparison of Mathematical Models and Development of a Hybrid Approach for the Simulation and Forecast of Influenza Epidemics with Heterogeneous Populations. Wien: TU Wien, 2007.
- [2] *Nance, R.E.*: A History of Discrete Event Simulation Programming Languages. ACM SIGPLAN Notices 28, No. 3 (1993), S. 149-175.
- [3] *Nävy, J.*: Facility Management: Grundlagen, Computerunterstützung, Einführungsstrategie, Praxisbeispiele. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

- [4] *Rabe M. & Spieckermann, S. & Wenzel, S.*: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [5] *Wenzel, S. & Weiß, M. & Collisi-Böhmer, S. & Pitsch, H. & Rose, O.*: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudie. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [6] *White, S.A.*: Introduction to BPMN. IBM, 2004.
- [7] *Wiegand, D. & Mebes, P. & Pichler, V.*: Event Based Simulations: Enabling Improved Development Planning and Partnership. Proceedings of Real Corp 007 (2001), S. 17-23.
- [8] *Wolf Gladrow, D.*: Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [9] *Wolter, C. & Schaad, A.*: Modelling of Task-Based Authorization Constraints in BPMN. Proceedings of 5th Intl. Conference BPM (2007), S. 64-79.

# **Ein Hybrides Modell zur Simulation von Raummanagement und Räumungszeiten**

S. Tauböck<sup>1)</sup>, M. Bruckner<sup>1,3)</sup>, N. Popper<sup>3)</sup>, D. Wiegand<sup>2)</sup>, S. Emrich<sup>2)</sup> und S. Mesic<sup>2)</sup>  
shabnam.tauboeck+e101@tuwien.ac.at

<sup>1)</sup> TU Wien, Institut für Analysis und Scientific Computing,  
Forschungsgruppe Mathematische Modellbildung und Simulation  
Wiedner Hauptstraße 8-10 / A-1040 Wien

<sup>2)</sup> TU Wien, Institut für Städtebau, Landschaftsarchitektur und Entwerfen  
Fachbereich Projektentwicklung und –management  
Gusshausstraße 30 / A-1040 Wien

<sup>3)</sup> DWH – Simulation Services  
Neustiftgasse 57-59 / A-1040 Wien

## **Kurzfassung**

Das Projekt „TU Univercity 2015“ an der TU Wien sieht die Modernisierung der bisher genutzten Gebäude und eine Konzentration der Fakultäten auf maximal zwei Standorte vor. Im Rahmen dieses Projekts wurde das Institut für Analysis und Scientific Computing beauftragt ein Modell zur Optimierung der Hörsaalbelegung zu erstellen und die Universitären Abläufe zu Simulieren. Dieses Model, das die Bezeichnung MoreSpace trägt, wurde Großteils in der Simulationssprache Enterprise Dynamics (ED) realisiert mit Ausnahme des Teiles der für die Ermittlung der Zeiten zuständig ist, die von den Studenten zu wechseln der Hörsaal benötigt. Diese Wegzeit-Simulation in der es in dieser Abhandlung geht wurde in der objektorientierten Programmiersprache JAVA realisiert und via TCP/IP mit Enterprise Dynamics verknüpft. Um das Dynamische Verhalten der einzelnen Individuen zu Modellieren wurde ein Agenbasiertes System gewählt bei dem sich die einzelnen Individuen auf einem diskreten Raster bewegen. Als Zellgröße wurde 0,125m x 0,125m gewählt, so dass 1 m<sup>2</sup> aus 64 Zellen besteht. Jeder Student nimmt 4 x 4 Zellen oder 0,5m x 0,5m in Anspruch.

## **1 Modellbeschreibung**

Einer der Hauptbestandteile des Modells sind die Studenten. Diese werden von ED an JAVA, mittels vordefinierter Befehle übergeben, in ihren Starthörsaal in der Simulation eingefügt und bewegen sich von dort an in Echtzeit so lange durch die Gebäudestruktur bis sie ihren Zielhörsaal erreicht haben und wieder an ED, mit der von ihnen benötigten Zeit, zurückgegeben werden.

Tabelle 1: Definierte Befehle.

Befehl	Kommunikationsrichtung
PING	JAVA → ED
ALIVE	JAVA ← ED
student[ <i>name from to</i> ]	JAVA ← ED
ack[ <i>name</i> ]	JAVA ↔ ED
student[ <i>name time</i> ]	JAVA → ED

### 1.1 Gebäudepläne

Der Import der Gebäudestrukturen erfolgt über reduzierte Pläne. Überflüssige Informationen die für die Simulation keine Bedeutung haben wurden entfernt. Um diese Gebäudepläne dem Modell zugänglich zu machen, werden diese, pro Zellulären Automaten, in eine Bilddatei, im Portable Network Graphics (. PNG) Format und in einer Textdatei (.txt) gespeichert. Die Graphik Datei beinhaltet den Grundriss, die Raumaufteilung (Unterteilung in Privaträume und Hörsäle) sowie die Stiegenhäuser und Korridore, wobei für jedes Pixel die drei Grundfarben des RGB Farbraumes (Rot-Grün-Blau) sowie zusätzlich der Alpha-Wert abgespeichert wird.

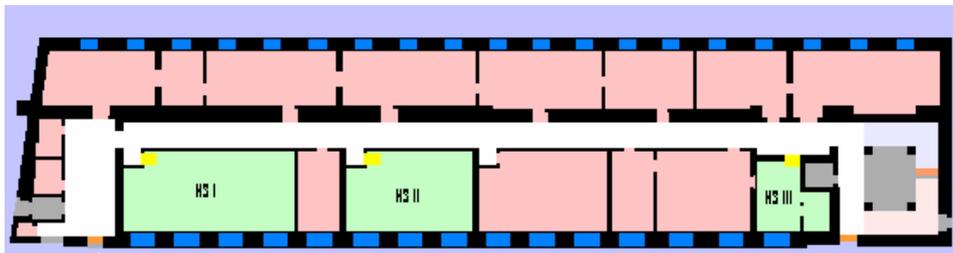


Bild 1: Bilddatei (Repräsentation des CA).

```

CellularAutomatonAF - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
# !!! valid keywords !!!
#
# LOCATION      (Building   floor)
# ROOM          (Name       ColorRGB)
# GATE          (Name       ColorRGB   nextCellularAutomata)
# STAIR         (Name       ColorRGB   nextCellularAutomata)
#
LOCATION        A      1
ROOM          HS1    255  255  1
ROOM          HS2    255  255  2
ROOM          HS3    255  255  3
GATE          A_G_1_2 255  155  51 CellularAutomatonAG
STAIR         A_S_1_1 255  155  100 CellularAutomatonAB
    
```

Bild 2: Textdatei.

Der Wertebereich für jeden dieser vier Kanäle liegt von 0 bis 255, nimmt also 8 Bit in Anspruch. Die Auflösung der Graphik ist so gewählt, dass jedes Pixel genau 0,125 x 0,125m in der Realität darstellt, was in der Simulation genau einer Zelle des Zellulären Automaten entspricht. Die Textdatei beinhaltet die Farbcodierung der Bilddatei, beschreibt also die Bedeutung der einzelnen Farbwerte der Bilddatei.

Jedes Gebäude wird auf mehrere Dateien aufgeteilt, die an mehreren Punkten, Stiegen oder Türen, miteinander verbunden sind um den Wechsel der Personen zwischen den CA zu ermöglichen. Um den Studenten das Leben zu vereinfachen und sie nicht blindlings durch die Weiten der einzelnen Zellulären Automaten auf der Suche nach ihren Zielhösaal zu scheuchen ist es vorab von nötig ihnen einen Plan mit auf den Weg zu geben wie sie von Punkt A zu Punkt B kommen und das wenn Möglich auf den kürzesten Weg.

## **1.2 Globale Wegsuche**

Um nun den kürzesten Weg auch über mehrere Zelluläre Automaten hinweg ermitteln zu können wurde auf die Graphentheorie zurückgegriffen. Mit Hilfe der eingelesenen Text- und Bilddateien wird nach dem Start und nach der Initialisierung aller Zellulären Automaten ein zusammenhängender ungerichteter und gewichteter Graph erzeugt indem es möglich ist, mit geeigneten Methoden, den kürzesten Pfad durch die einzelnen Gänge der CAs zu ermitteln. Hierfür wurde auf einen leicht abgeänderten Dijkstra-Algorithmus zurückgegriffen der im Folgenden nun kurz erläutert wird.

1. Markierung der Distanz des Startknotens als permanent, alle anderen Distanzen als temporär.
2. Setze den Startknoten als aktiven Knoten.
3. Berechne die temporären Distanzen aller Nachbarknoten des aktiven Knotens durch Addition von dessen Distanz mit den Kantengewichten.
4. Wenn eine solche berechnete Distanz für einen Knoten kleiner ist als die aktuelle, aktualisiere die Distanz und setze den aktuellen Knoten als Vorgänger. Dieser Schritt wird auch als Update bezeichnet und ist die zentrale Idee von Dijkstra.
5. Wähle einen Knoten mit minimaler temporärer Distanz als aktiv. Markiere seine Distanz als permanent.
6. Wiederhole 4-7, bis es keinen Knoten mit permanenter Distanz gibt, dessen Nachbarn noch temporäre Distanzen haben.

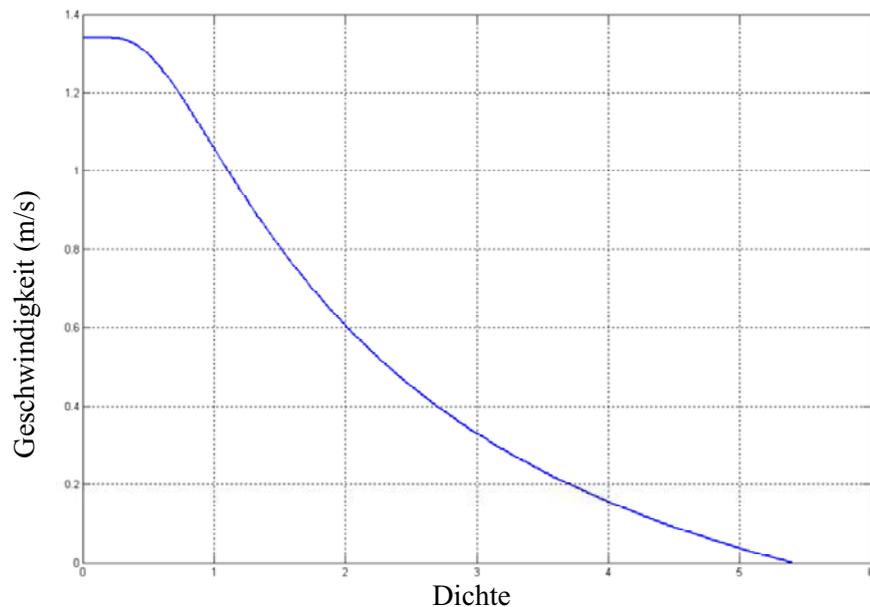
## **1.3 Lokale Wegsuche**

Bei der Lokalen Wegsuche handelt es sich um das Bestreben, der sich in der Simulation bewegend Individuen, den kürzest möglichen und somit meist schnellsten Weg durch den einzelnen Zellulären Automaten zu suchen und zu finden. Um dies umzusetzen wurde das, in vielen Literaturen benutzte, Static Floor Field angewandt. Wie der Name schon sagt handelt es sich hierbei um ein Feld von statischen, also um bei der Initialisierung des Feldes fix gesetzten, Werten die die Distanzen zu den einzelnen sogenannten Wegpunkten, dazu gehören die Hörsälen, Stiegen und Übergängen, repräsentieren. Hierfür enthält, in der Simulation, jede Zelle eine Datenstruktur (Array[]) die für jeden im Automaten vorkommenden Wegpunkt diesen statischen Wert enthält, an dem sich die Studenten orientieren können. Zur Initialisierung dieser Datenstruktur wurde der Flood

Fill (enlg. Flutfüllung) Algorithmus verwendet. Dieser ist ein einfaches Verfahren aus der Computergraphik, um Flächen von zusammenhängenden Pixeln einer bestimmten Farbe in einem digitalen Bild zu erfassen und sie mit einer neuen Farbe zu füllen.

#### 1.4 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit mit der sich Personen bewegen wird maßgeblich durch die Interaktion zwischen den einzelnen Individuen und der Umgebung in der sie sich befinden bestimmt. So ist es für den einzelnen von Bedeutung ob er über eine ebene Fläche geht oder sich über Stiegen bewegt. Der Einfluss den andere Personen auf die eigene Geschwindigkeit haben beschränkt sich im Wesentlichen auf deren Anzahl, also auf die Personendichte und deren Gehgeschwindigkeit, wobei letzteres, um die Simulation zu vereinfachen, nicht berücksichtigt wird. So wird stets davon ausgegangen das sich alle Individuen mit ihrer maximalen Geschwindigkeit bewegen. Ebenfalls werden Aspekte wie Beschleunigungs,- bzw. Bremszeiten sowie Einschränkungen bei Änderungen der Richtung nicht berücksichtigt.



**Bild 3:** Näherungsrelation von Kladek bei  $v_h^0 = 1.34$  m/s.

Der Einfluss der Fußgängerdichte auf die Fortbewegung kann zum Beispiel mit der Näherungsrelation von Kladek beschrieben werden, die eine Beziehung zwischen der Dichte und der Geschwindigkeit durch

$$v_n(\rho) = v_h^0 \left( 1 - \exp\left(-r \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{max}}}\right)\right) \right) \quad [1]$$

mit der Geschwindigkeit auf freier Fläche  $v_h^0$ , der maximal zulässigen Dichte  $\rho^{\max}$  und einer Eichkonstanten  $\gamma$ , die empirische Untersuchungen zugrunde liegen, wobei in der Literatur für  $\rho^{\max} = 5,4 \text{ P/m}^2$  und  $\gamma = 1.913$  vorgeschlagen werden. Für den Wert  $v_h^0$ , also die maximale Geschwindigkeit die je nach Untergrund verschieden ist, wurden für die Simulation drei verschiedene Werten festgelegt.

- 1.34 m/s für alle Korridore und Hörsäle [2]
- 0.61 m/s für alle Stiegen die hinauf führen [3]
- 0.71 m/s für alle Stiegen die hinunter führen [3]

## 1.5 Deadlock

Die schwierigste Aufgabenstellung bei der Implementierung des Modells war es mit dem Problem des Deadlock fertig zu werden, das Auftreten wenn sich Studenten gegenseitig behindern und es so zu einem Stillstand der Simulation kommt. Dieses Phänomen trat vor allem sehr häufig bei engstellen wie Türen oder ähnlichen auf wenn größere Menschenmassen aufeinandertrafen und versuchten sie gleichzeitig zu passieren. Aber auch relativ weitläufige Gebiete wie Gänge blieben von einer Verstopfung nicht verschont. Schon eine relativ kleine Kollision schaukelte sich oft im Nu zu einer vollständigen Blockade und so zu einem Deadlock auf. Um diesen Missstand zu beheben wurden einige Mechanismen implementiert die Blockaden im Vorfeld erkennen und zu verhindern versuchen, sowie Deadlocks aufzulösen wenn sie trotz alledem passiert sind.

- **Reagieren auf andere Studenten:** Die erste und vielleicht auch wirkungsvollste Maßnahme ist das vorausschauende Gehen, dass aus der realen Welt durch ein bewusstes Überlegen wie ich Kollisionen auf der Straße und in Gebäuden im täglichen Leben zu vermeiden versuche, übernommen wurde. Um das umzusetzen wird, bevor der nächste Schritt berechnet wird, ein Bereich von zirka 1,5 Meter Breite und 8 Meter Länge, vor dem zu bewegendes Individuum durchsucht und alle Studenten die in diesem Gebiet gefunden werden, vorab in drei Gruppen je nach ihren relativen Gehrichtungen klassifiziert ((1)Verkehr, (2)Querverkehr, (3)Gegenverkehr). Diese Unterteilung ist maßgeblich für die Auswahl des nächsten Schrittes. Zum Beispiel beim Überholen eines Studenten, oder Platz machen für den Gegenverkehr.
- **Anrempeln:** Um Richtungswechsel auch zu ermöglichen wenn sich parallel und in dieselbe Richtung ein weiterer Student bewegt der ein Ausweichen verhindert ist ein anrempeln in der Simulation implementiert bei dem den hinderlichen Studenten mitgeteilt wird, in welche Richtung er Platz machen soll. Der Angerempelte wird in der Evaluierung seiner nächsten Schritte dieser Aufforderung Platz zu machen mit einfließen lassen, abhängig davon ob er sich dadurch nicht selbst vielleicht auf Kollisionskurs begibt
- **Rechtsverkehr:** Die nächste Maßnahme zur Vermeidung von Kollision und daraus folgenden Deadlocks ist der Rechtsverkehr. Obwohl nur im Straßenverkehr zwingend vorgeschrieben hat es sich doch auch im Fußgängerverkehr eingebürgert, dass ein rechts aneinander vorbeigehen eher bevorzugt wird. Dieses Verhalten kann man immer wieder in der Öffentlichkeit beobachten und wird auch in der Literatur

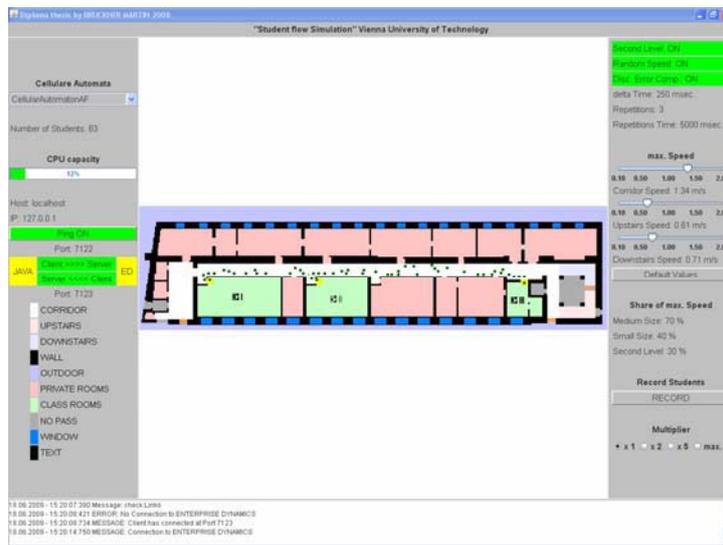
durch verschiedene Experimente beschrieben. Dieser Rechtsverkehr wird auch den virtuellen Studenten der Simulation mit auf den Weg gegeben. So orientieren sich beide, sobald sie sich gegenseitig entdecken nach rechts, was in den meisten Fällen, abhängig von der Fußgänger Dichte, zu einem Problemlosen aneinander Vorbeigehen führt.

- **Variable Größe:** Eine weitere recht nützliche Methode ist das Verhalten von Menschen Nachzuehmen die in die Situation kommen, dass der von ihnen Benötigte Platz, zum Beispiel beim passieren ein ihnen entgegenkommenden Person, nicht ausreicht um weiter „normal“ gehen zu können. Instinktive verkleinern wir unseren Platz, etwa mit dem drehen der Schulter nach vorne, um mit unserer Fortbewegung nicht ins Stocken zu geraten. Dieses Verkleinern wurde ebenfalls in diesem Modell umgesetzt. Jeder Student benötigt im Normalfall in der Simulation 0,25m<sup>2</sup> was 4x4 Zellen entspricht. Dieser Platzbedarf kann, wenn es die Situation erforderlich macht, auf 3x3 beziehungsweise 2x2 Zellen reduziert werden.
- **Warten vor dem Hörsaal:** Eine weiter potentielle Gefahrenquelle für Blockaden sind die Eingänge zu den einzelnen Hörsälen. Ein recht häufig auftretendes Szenario in der Simulation ist, wenn sich im Hörsaal noch Studenten befinden die gerade dabei sind ihn zu verlassen und am Korridor davor schon die ersten Personen ein treffen die den Unterrichtsraum betreten wollen. Um mit diesem Problem umzugehen wurde wieder auf die reale Welt zurückgegriffen und dort wird, da wir doch in einer recht zivilisierten Welt leben, vor dem Saal gewartet um den Personen zu ermöglichen ihn Problemlos zu verlassen.
- **Zweite Ebene:** Da es trotz der oben genannten Maßnahmen zur Vermeidung von Deadlocks in Extremsituationen, wie das Zusammentreffen von größeren Personengruppen an einer Engstelle, zum Stillstand der Simulation durch sich behindernde Studenten kommen kann, wurde als letzter Rettungsanker eine zweite Ebene in die Zellulären Automaten eingefügt. Über diese zweite Ebene hinweg können sich Blockaden abbauen und es wird dadurch sichergestellt, dass die Studenten ihr vorgegebenes Ziel erreichen.

## 1.6 Benutzerschnittstelle

Oder auch kurz HMI (Human-Machine Interface), soll dem Benutzer die Möglichkeit geben mit dem Computerprogramm zu interagieren und Programmabläufe für Anwender sichtbar zu machen.

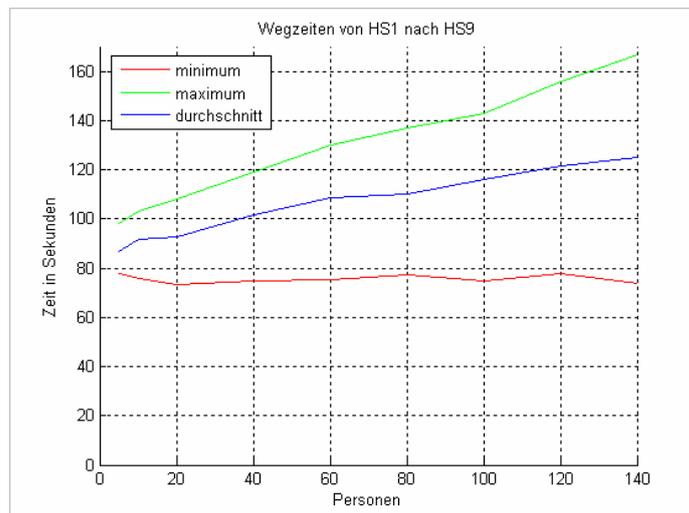
In der Darstellung des Interfaces der JAVA-Applikation (Bild 4) die für dieses Modell erstellt wurde sind an der linken Seite die Anzeige für die Kommunikation mit ED sowie die Legende die die einzelnen Farben in den Gebäudeplänen repräsentieren zu sehen. Im Hauptfenster ist ein Plan während eines Simulationslaufes (also mit bereits enthaltenen Studenten) zu sehen. Die rechte Toolbox enthält diverse Parameter und Regler mit denen aktiv auf die Geschwindigkeit der Individuen eingegriffen werden kann. Eine Gesamtsimulation setzt sich aus unterschiedlichen Gebäudeteilen zusammen, die parallel simuliert werden. Der Benutzer kann zwischen diesen Gebäudeteilen hin- und herschalten um den Ablauf der Simulation zu überwachen und etwaige Engstellen identifizieren zu können.



**Bild 4:** User Interface zur Bedienung des Simulators.

## 2 Szenarien

Bei diesen Szenarien soll die Abhängigkeit der Wegzeiten von der Personendichte gezeigt werden. Der nachfolgende Versuch wurde 10-mal in Folge durchgeführt, wobei bei jedem dieser Durchläufe die kürzeste und längste Wegzeit sowie der Mittelwert aus den einzelnen Zeiten der Studenten ermittelt wurde.



**Bild 5:** Änderung der Wegzeit in einem Testszenario, abhängig von der Zahl der Individuen in einem Gebäudeteil.

Die Zeiten der einzelnen Studenten wurden ohne Wartezeit in den Hörsälen gemessen. So Starten die Zeitmessungen erst, wenn die betreffenden Person an der Hörsaaltür sind.

Bild 5 illustriert die Daten des simulierten Szenarios. Zu sehen sind die Minimalen, Maximalen und die Durchschnittlichen Zeiten die zum Wechsel des Hörsaals benötigt wurden. Wie nicht anders zu erwarten war erhöht sich die Durchschnittliche und Maximale Dauer die für den zurückzulegenden Weg benötigt wird stetig, was auf die reduzierte Geschwindigkeit bei höherer Personendichte zurückzuführen ist, während das Minimum mit Ausnahme von leichten Schwankungen nahezu unverändert bleibt. Dieser konstante Wert ist aber nicht weiter verwunderlich, da die ersten Studenten die den Hörsaal verlassen jedes Mal leere Gänge vorfinden und so bei jedem Durchlauf dieselben Zeiten zum Wechsel benötigen.

### **3 Literatur**

- [1] *Péter Molnár*. Modellierung und Simulation der Dynamik von Fußgängerströmen. Shaker Verlag, Aachen 1996.
- [2] *Péter Molnár*. Modellierung und Simulation der Dynamik von Fußgängerströmen. Shaker Verlag, Aachen 1996.
- [3] *Taku Fujiyama, Nick Tyler*. An Explicit Study on Walking Speeds of Pedestrians on Stairs. Centre for Transport Studies, University College London.

# **Untersuchung der Effekte in der CCS-Verfahrenskette – Modellierung der CO<sub>2</sub>-Prozess- und Transportkette vom Brennstoff bis zum Reservoir**

Michael Nimtz, Matthias Klatt und Hans Joachim Krautz  
michael.nimtz@tu-cottbus.de oder mklatt@tu-cottbus.de

BTU Cottbus, Lehrstuhl Kraftwerkstechnik

Walther-Pauer-Straße 5, 03046 Cottbus / Postfach 101344, 03013 Cottbus

## **Kurzfassung**

Die Entwicklung neuartiger Kraftwerke mit integrierter Kohlendioxidabscheidung und anschließender Speicherung des Kohlendioxids (Carbon Dioxide Capture and Storage - CCS) führt zu einem komplexen Verbund aus Anlagen und Prozessen. Dieser Verbund lässt sich grob einteilen in: Kraftwerksprozess – CO<sub>2</sub>-Abscheidung – CO<sub>2</sub>-Aufbereitung – CO<sub>2</sub>-Transport – CO<sub>2</sub>-Speicherung.

Bisherige Studien konzentrierten sich meist nur auf einen Abschnitt dieser CCS-Prozesskette, die Wirkungen und Rückwirkungen auf andere Glieder der Verfahrenskette werden meist nur rudimentär betrachtet. Aufgrund vielfältiger Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Abschnitten ist es jedoch nötig, das Verhalten des Verbundsystems grundlegend zu untersuchen, um einen sicheren und effizienten Betrieb zu gewährleisten.

Es wird ein Ansatz vorgestellt, beliebige CCS-Systeme zu modellieren und Schlussfolgerungen auf die Auslegung und den zukünftigen Betrieb eines solchen Verbundes zu ziehen.

## **1 Einleitung**

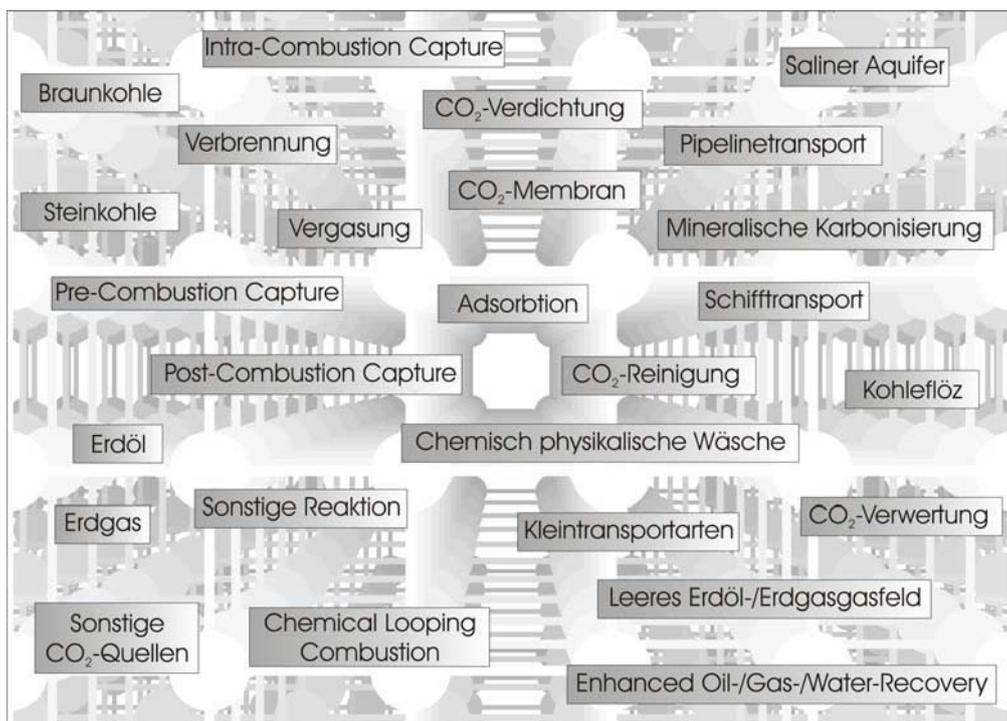
In den letzten Jahren kam es in vielen Ländern zu einem ideellen Umdenken bei der energetischen Nutzung von fossilen Brennstoffen. Dies wurde nicht zuletzt durch die Verpflichtungen zur Senkung der Treibhausgasemissionen, die sich aus der Ratifizierung des Kyoto-Protokolles ergeben, forciert. Unter anderem führte dieses Umdenken in den letzten Jahren zu einem massiven Anstieg der Forschungstätigkeit in Bezug auf die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Großkraftwerken. Neben der Effizienzsteigerung werden große Hoffnungen in die so genannte CCS-Technologie gesteckt [1].

CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) bezeichnet verschiedene Verfahren zur dauerhaften Abtrennung und Speicherung des bei der Nutzung fossiler Energieträger frei werdenden Kohlendioxids. Durch die Entfernung des Kohlendioxids aus dem Kohlenstoffkreislauf hofft man, die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Erdatmosphäre zu senken oder zumindest auf dem derzeitigen Level zu halten. Dies soll mittelfristig dazu beitragen, dem globalen Klimawandel entgegenzuwirken, solange, bis die weltweite Energieversorgung sich zu großen Teilen aus emissionsarmen, erneuerbaren

Energiequellen speist. Deshalb wird die CCS-Technologie auch als Brückentechnologie zwischen dem fossilen und dem solaren Energiezeitalter bezeichnet.

## 2 CCS-Matrix

Hinter dem Begriff CCS verbirgt sich eine Vielzahl von Elementen (Konzepte, Verfahren, Stoffströme, Anlagen) die zum Großteil miteinander kombinierbar sind. Die Gesamtheit dieser Elemente kann man als CCS-Matrix bezeichnen. Einen knappen Überblick über die CCS-Matrix kann Bild 1 geben:



**Bild 1:** CCS-Matrix.

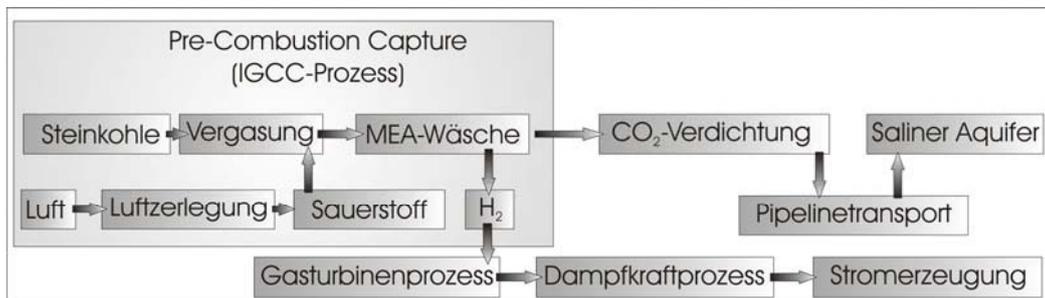
Die Elemente der Matrix kann man nach verschiedenen Gesichtspunkten sortieren:

- Art des Kohlenstoffträgers (Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas, Biomasse, Mineralien (Zementproduktion [2]), ...)
- Art der Umwandlung des Kohlenstoffträgers zu Kohlendioxid (Verbrennung, Vergasung, sonstige Reaktionen)
- Nutzungsart des Kohlenstoffträgers (Stromerzeugung, Wärmeerzeugung, Chemische Grundstoffproduktion, ...)
- Ort bzw. Zeitpunkt der Abtrennung des CO<sub>2</sub> aus dem Kreislauf (Pre-Combustion Capture, Intra-Combustion Capture, Post-Combustion Capture)

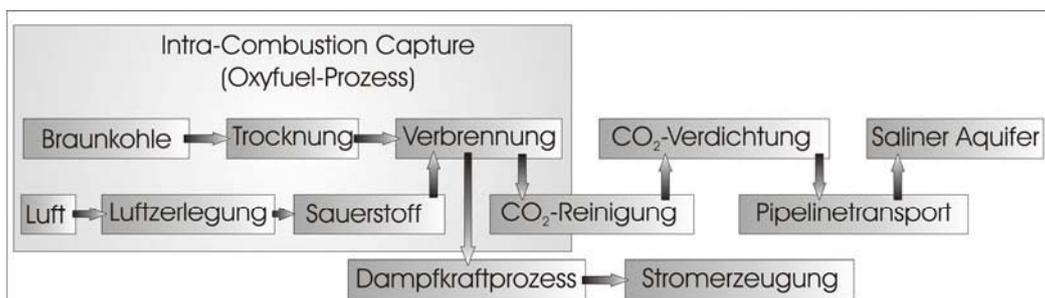
- Art der CO<sub>2</sub>-Abtrennung (chemische oder physikalische Absorption, Adsorption, Membranverfahren, Rein-CO<sub>2</sub>-Erzeugung)
- CO<sub>2</sub>-Aufbereitungsart (Trocknung, Verdichtung, Verflüssigung, Rektifikation)
- Transportart (Pipeline, Schiff, Schiene, Straße, ...)
- Art der CO<sub>2</sub>-Speicherung (Saline Aquifere, leere Öl- oder Gasfelder, Nutzung zur Steigerung von Reservoirdrücken (Öl, Gas, Wasser), Nutzung als Grundstoff, ...)

Bisherige Studien betrachteten meist nur einzelne Teile der Verfahrensketten, wie zum Beispiel neue Kesselkonstruktionen, Kraftwerkskonzepte oder mögliche Lagerstätten für das abgeschiedene Kohlendioxid. Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen der CCS-Matrix wurden bisher nicht grundlegend untersucht. Zudem beruhen viele Studien auf Annahmen von Randbedingungen, die oftmals kaum hinterfragt werden, da sich im Bereich der CCS-Forschung sehr viele Disziplinen treffen, die nur selten in direktem Kontakt zueinander stehen und so der nötige Erfahrungsaustausch noch fehlt.

Im Rahmen der Forschung am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus sollen die wichtigsten Prozessketten aus dem Bereich der Energiebereitstellung im Detail untersucht werden. Dies wären im ersten Schritt (ausgehend von den Rohstoffquellen und der Energiestruktur in Deutschland) vor allem verschiedene Kohlekraftwerke mit integrierter CO<sub>2</sub>-Abscheidung sowie der anschließende Transport per Pipeline zu einem salinen Aquifer in Norddeutschland als Speicher.

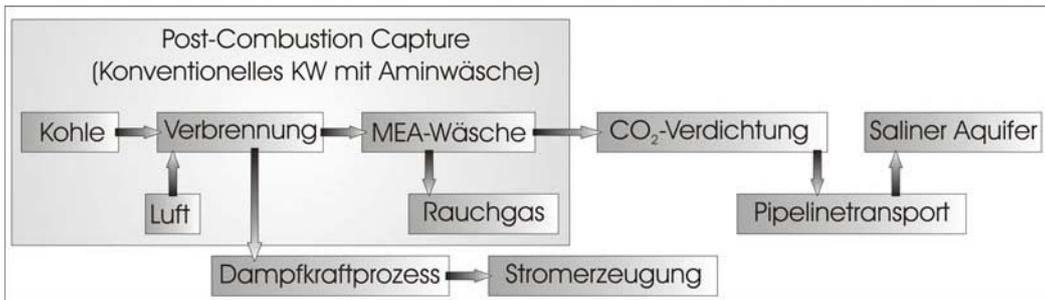


**Bild 2:** Pre-Combustion Capture Prozesskette.



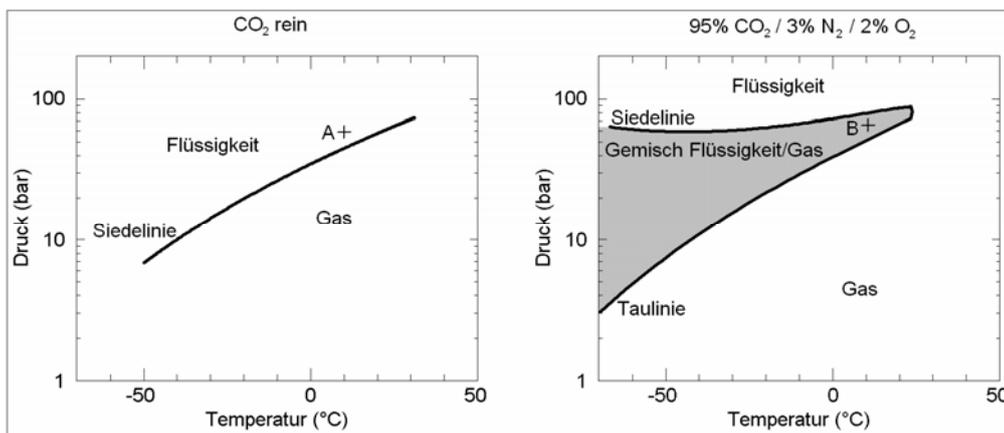
**Bild 3:** Intra-Combustion Capture Prozesskette.

Die ausführliche Analyse der Koppelungen zwischen den einzelnen Prozessschritten bildet die Grundlage für die Entwicklung von CCS Strategien, die eine hocheffiziente und zuverlässige Energieversorgung sowie eine langfristig sichere Speicherung gewährleisten können. Die vielversprechendsten Prozessketten sind (grob strukturiert) in Bild 2 bis 4 dargestellt.



**Bild 4:** Post-Combustion Capture Prozesskette.

Ein Beispiel für die komplexen Rückkoppelungen innerhalb der Prozesskette ist der Einfluss der Zusammensetzung des überkritischen, CO<sub>2</sub>-reichen Fluides, welches in Zukunft in salinen Aquiferen gespeichert werden soll. Aus materialtechnischen, geochemischen und geomikrobiologischen Gründen gibt es Einschränkungen in den Anteilen an Begleitstoffen (H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.), die im CO<sub>2</sub> enthalten sein dürfen. Gleichzeitig führen diese Begleitstoffe zu starken Abweichungen in den thermodynamischen Eigenschaften und den Transporteigenschaften des Gemisches [2, 3]. Vor allem die Dichte und die Phasenübergänge von gasförmig zu flüssig werden schon von geringsten Beimengungen beeinflusst.



**Bild 5:** Phasenverhalten CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Gemisch.

Dies ist zum besseren Verständnis noch einmal im Bild 5 dargestellt. Während reines CO<sub>2</sub> (Bild 5 links) bei einem Druck von 50 bar und einer Temperatur von 10°C als

Flüssigkeit vorliegt (Punkt A, Bild 5), zerfällt ein Gemisch aus 95% CO<sub>2</sub> 3% N<sub>2</sub> und 2% O<sub>2</sub> bei den selben Druck- und Temperaturbedingungen (Punkt B, Bild 5) in 2 separate Phasen (Gas und Flüssigkeit). Dieser Zustand ist problematisch für viele Anlagenteile (vor allem Pumpen und Rohrleitungen) und sollte möglichst vermieden werden. [5]

Diese Abweichungen im thermodynamischen Verhalten des CO<sub>2</sub>-Gemisches wirken sich sowohl auf die Prozessführung (z. B. Drücke am Pipeline-Eintritt) als auch auf die Dimensionierung (Volumenströme durch Rohre und Apparate) aus. Im Gegenzug kann es bei Betrieb der Anlagen in Teillast durch die fest vorgegebenen Dimensionen der Apparate zu Betriebszuständen kommen, die technisch oder wirtschaftlich nicht mehr vertretbar sind. Aus diesen einfachen Beispielen lässt sich bereits die Fülle der zu beachtenden Einflüsse und Zusammenhänge und damit der bestehende Forschungsbedarf erkennen.

### 3 Modellbildung und Simulation

Um die Untersuchungen durchführen zu können, muss eine Reihe von Schritten abgearbeitet werden. Zu Beginn werden grob die zu untersuchenden Prozessketten festgelegt. Eine mögliche Prozesskette wäre zum Beispiel: Braunkohle – Oxyfuel Kessel – Rauchgasreinigung – CO<sub>2</sub>-Aufbereitung und Verdichtung – Pipelinetransport – Speicherung in salinem Aquifer. Ähnlich diesem Beispiel sollen Prozessketten für die vielversprechendsten CCS Verfahren (Nutzung von Braun- oder Steinkohle durch Pre-Combustion (z.B. IGCC), Intra-Combustion (z.B. Oxyfuel) oder Post-Combustion (z.B. Aminwäsche) in Kombination mit Pipelinetransport und Speicherung in leeren Gasfeldern oder salinen Aquiferen) aufgestellt und untersucht werden.

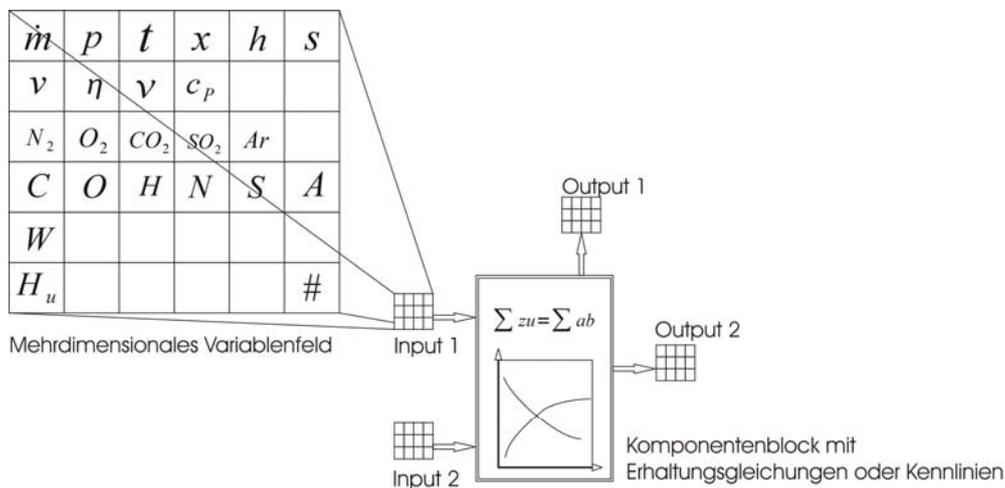
Für jede Prozesskette erfolgt eine Analyse der beteiligten Anlagen und Fluide, sowie der Schnittstellen zwischen den einzelnen Prozessen. Im nächsten Schritt wird für jeden Prozessabschnitt ein mathematisches Modell (basierend auf Massen- und Energiebilanzen) erstellt, das dessen physikalisches und chemisches Verhalten unter stationärem Betrieb beschreibt. Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad können auch empirisch bestimmte Funktionen oder Kennlinien hinterlegt werden, so dass auch komplexe Anlagen (zum Beispiel kryogene Luftzerlegungsanlagen) mit relativ wenig Aufwand in ein Gesamtmodell eingefügt werden können.

Ein wichtiger Teil der Modellbildung ist die Bereitstellung von Funktionen zur Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen beteiligter Fluide und Gemische (Wasser, flüssige Luft, Rauchgas, Waschflüssigkeiten und Kohlendioxidgemische). Die einzelnen Modelle der Prozesse und Anlagen werden als Funktionen in MATLAB/Simulink<sup>®</sup> programmiert. Die wichtigsten so dargestellten Baugruppen sind:

- Wärmeübertrager, Heizflächen, Kondensatoren
- Rohrleitungen, Behälter, Armaturen
- Pumpen, Verdichter, Turbinen
- Brennkammern, Reaktoren, Wäscher, Filter, Abscheider
- Mess- und Regelelemente

Diese können zu jedem beliebigen Gesamtsystem zusammengesetzt werden. Der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Funktionen erfolgt über ein mehrdimensionales Feld, das thermodynamische Größen, Zusammensetzungen und weitere relevante Parameter und Informationen enthält (siehe Bild 6).

Die Verknüpfung der einzelnen Funktionen zu einem Gesamtsystem erfolgt grafisch unter Simulink® in Form von Komponentenblöcken mit einer fest definierten Zahl von ein- und ausgehenden Informationsströmen (Stoff- und/oder Energieströmen). Dadurch ist es möglich, auch komplexe Energieerzeugungssysteme fehlerfrei zusammenzusetzen. Durch Hinterlegung von Standardparametern in den einzelnen Funktionen kann der Aufwand beim graphischen Erstellen eines Modelles zum Teil erheblich reduziert werden. So können zum Beispiel häufig vorkommende Stoffzusammensetzungen (Luft, Kohle, Erdgas etc.) sowie diverse Wirkungsgrade vorab in den Funktionen hinterlegt werden und müssen nicht aufwendig per Hand eingetragen werden. Wohl aber müssen sie auf ihre Gültigkeit im jeweils aktuellen Modell überprüft werden.



**Bild 6:** Variablenfeld und Funktionsblock.

Das durch die Verknüpfung der einzelnen Funktionsblöcke aufgebaute Gleichungssystem kann nun, unter Vorgabe bestimmter Randbedingungen mit Hilfe der MATLAB/Simulink®-eigenen Werkzeuge oder neu erstellten Lösungsalgorithmen gelöst werden. Ein großer Vorteil der Nutzung von MATLAB/Simulink® ist die relativ einfache Implementierung von fremden Rechenroutinen (z. B. Stoffwertberechnungsgleichungen in Form von FORTRAN-Quellcode oder DLLs). Außerdem kann Simulink® zur Verwaltung und zur Kombination häufig genutzter Komponentenblöcke genutzt werden, indem man eigene Bibliotheken im Simulink Library Browser anlegt.

## 4 Analyse und Bewertung

Wenn sichergestellt ist, dass alle Prozesse physikalisch korrekt abgebildet wurden, können detailliertere Analysen stattfinden. Diese beinhalten:

- Vergleich einzelner Kraftwerksprozesse und Abscheideverfahren in Bezug auf Energieeffizienz
- Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von Kraftwerk, Pipeline und Speicher
- Abschätzung des Teillastverhaltens
- Sensitivitätsanalysen zu Auswirkungen von Druck-, Temperatur- und Zusammensetzungsschwankungen
- Definition von Parametern an den Schnittstellen der großen Systeme (Kraftwerk, Abscheidung, Transport, Speicher) zur Schaffung einer einheitlichen Datenbasis für alle an der Planung beteiligten Organisationen
- Optimierung der Verschaltung der einzelnen Anlagen

Das Ziel der Untersuchungen am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik ist die Definition von möglichen Bandbreiten für die wichtigsten Einflussfaktoren auf die CCS-Verfahrenskette an den Schnittstellen der einzelnen Prozessabschnitte. Dies betrifft sowohl die Prozessparameter wie Drücke, Temperaturen und Zusammensetzungen als auch die Auslegung von Komponenten und die Fahrweise von Anlagen. Gleichzeitig wird das Systemverhalten unter bestimmten Umständen wie unter Teillast oder beim Ausfall einzelner Anlagenteile untersucht und darauf aufbauend ein Schema sicherer Betriebszustände des Anlagenkomplexes erstellt. Die Besonderheit der hier vorgestellten Untersuchungen besteht in der Betrachtung des Gesamtsystemes im Verbund und den sich dadurch ergebenden Problemstellungen.

Die Untersuchungen sollen außerdem dazu dienen, die bisher für den Kraftwerksbereich untypischen Komponenten, wie Luftzerlegungsanlagen, Kohlevergaser, Rauchgaskondensatoren und Verdichterstationen sowie die Transport- und Speicherstrecke optimal zu einem Gesamtprozess zu kombinieren und so einen Teil der Wirkungsgradeinbußen gegenüber einem Kraftwerk ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung wettzumachen.

## 5 Ausblick

In einem weiteren Schritt könnten in Zukunft Kostenfunktionen und Baugrößen einzelner Komponenten hinterlegt werden, um so das Basic-Design für künftige Kraftwerke im Verbund mit Transport- und Speichersystem zu erstellen. Durch den modularen Aufbau und den direkten Zugriff auf alle Stufen der Modellbildung ist es relativ einfach, nachträglich Funktionalitäten und Nebenrechnungen in die Funktionen einzubauen.

## 6 Literatur

- [1] *Hake, J.-F. et al.*: CCS for Germany: Policy, R&D and demonstration activities. *Energy Procedia* 1 (2009), S. 3917-3925.

- [2] *Barke, D.J et al.*: CO<sub>2</sub> Capture in the Cement Industry. *Energy Procedia* (2009), S. 87-94
- [3] *Li, H. et al.*: Impurity impacts on the purification process in oxy-fuel combustion based CO<sub>2</sub> capture and storage system. *Applied Energy* 86 (2009), S. 202-213
- [4] *de Visser E et al.*: Dynamis CO<sub>2</sub> quality recommendations. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2 (2008) S. 478-484
- [5] *Li, H, Yan, J.*: Evaluating cubic equations of state for calculation of vapor–liquid equilibrium of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-mixtures for CO<sub>2</sub> capture and storage processes. *Applied Energy* 86 (2009) S. 826–836

# **Aufbau eines Verbundes aus Standard- und Echtzeitsimulatoren sowie Hardware für das Design thermischer Systeme**

Martin Loeffler, Martin Schüler und Wilhelm Tegethoff  
m.loeffler@tlk-thermo.de  
TLK-Thermo GmbH, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig  
Manuel Gräber, Norbert Stulgies, Christian Schulze  
Institut für Thermodynamik der TU Braunschweig  
Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig

## **Kurzfassung**

Für die Domäne thermischer Systeme soll ein Simulationsverbund, bestehend aus echtzeitfähigen Systemen und Standardsimulatoren, aufgebaut werden. In diesem Beitrag wird dazu ein entsprechender strukturierter Lösungsweg zur Kopplung von Hardware, Echtzeit- und Standardsystemen aufgezeigt. Die verwendete Technik ermöglicht es beispielsweise, für die Offline-Simulation erstellte Modelle im Echtzeitkontext wiederzuverwenden.

## **1 Einleitung**

Die moderne Simulationstechnik kann die Entwicklung thermischer Systeme von der Konzeptionierungsphase bis hin zum Test von realen Reglern unterstützen. Der Dampfprozess im Kraftwerk, das Thermomanagement eines PKWs oder Kreisprozesse in Klimaanlage und Wärmepumpen sind typische thermische Systeme, in denen sowohl lange Zeitkonstanten im Sekundenbereich als auch kurze im Millisekunden-Bereich vorkommen. In der Regel sind diese Zeitkonstanten mit spezifischen Rechenzeiten verbunden und entscheiden neben der numerischen Komplexität maßgeblich über die Echtzeitfähigkeit der Modelle. Standardsimulatoren wie z. B. Dymola, SimulationX oder Flowmaster können geeignete Modellbibliotheken für thermische Komponenten einbinden und damit offline auf Standardbetriebssystemen komplette thermische Systeme unter Berücksichtigung aller Zeitkonstanten simulieren. Gegebenenfalls können die Standard-Simulatoren zu einem Co-Simulationsverbund verknüpft werden. Im Offline-Modus können beispielsweise ohne Rücksichtnahme auf das Echtzeitverhalten Optimierungsrechnungen durchgeführt oder auch Regelalgorithmen mit Hilfe von Modell-in-the-Loop entwickelt und getestet werden.

Die Ankopplung von Hardware an das Simulationsmodell des thermischen Systems erfordert jedoch das Echtzeitverhalten des Simulators. Die Hardware kann je nach Anwendung und Zielrichtung ein realer Regler, ein einzelnes Bauteil oder sogar das reale Gesamtsystem sein. Gewöhnlich kommen in größeren Firmen die jeweiligen Anwender von Standard- und Echtzeitsimulatoren aus unterschiedlichen Fachabteilungen. Diese

Tatsache führt neben den modellphysikalischen, numerischen und personellen Herausforderungen in der Regel dazu, dass die Modelle für Echtzeitanwendungen komplett neu erstellt werden müssen, sofern sie nicht mit Hilfe entsprechender Simulatorexportfunktionen unter echtzeitfähigen Betriebssystemen oder HIL-Systemen verwendet werden können.

Im Rahmen dieses Beitrages wird aufgezeigt, dass sich insbesondere im Bereich der Simulation thermischer Systeme in vielen Fällen die drei Bereiche Standardsimulator, Echtzeitsimulator und Hardware zu einem Verbund kombinieren lassen. Hiermit können hinreichend effiziente, aber nicht auf Echtzeitsysteme exportierbare Modelle in Kombination mit exportierten echtzeitfähigen Modellen wiederverwendet werden. Eine aufwendige komplette Neuerstellung von Modellen wird damit vermieden. Grund für die Nicht-Exportierbarkeit von Modellen kann der jeweils verwendete Simulator sein. Flowmaster z.B. verfügt nicht über eine Exportfunktionalität. Aber auch hochgradig nichtlineare Modellstrukturen, wie sie gewöhnlich in thermischen und hydraulischen Modellen auftreten, können einen Export in die Echtzeitdomäne derzeit verhindern.

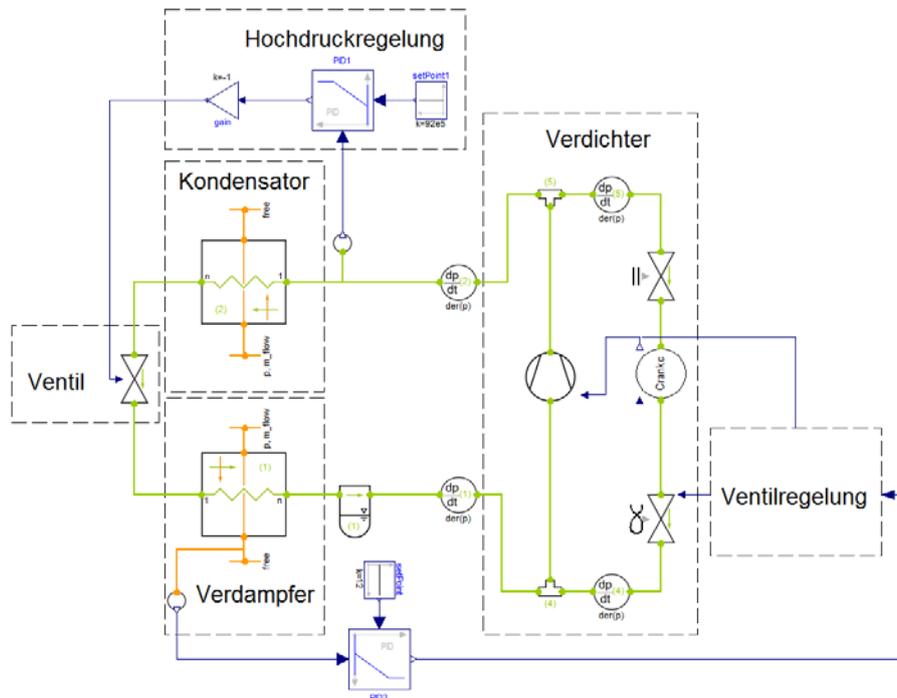
## 2 Das Simulationsmodell

Als Basis für die Demonstration eines Simulationsverbunds dient ein unter Modelica modellierter Kältekreislauf einer PKW-Klimaanlage mit dem Kältemittel R744 (siehe [6]). Ein schematischer Aufbau der Anlage ist in Bild 1 anhand der unter der Modelica Bibliothek TIL erstellten Simulationsmodelle dargestellt (siehe [4]). Der Kältekreislauf besteht aus den vier Komponenten Gaskühler, Expansionsventil, Verdampfer und Kompressor, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Im Gaskühler bzw. Kondensator wird Wärme vom Kältemittel an die Umgebung abgegeben. Je nach Güte des Gaskühlers und Größe des Luftvolumenstroms wird das Kältemittel bis nahe an die Umgebungstemperatur abgekühlt. Nach der Druckabsenkung durch das Ventil strömt das Kältemittel durch den Verdampfer. Das verdampfte Kältemittel wird schließlich vom Verdichter angesaugt und auf das Hochdruckniveau verdichtet. Zum Anpassen der Kältemittelfüllmenge an die verschiedenen Betriebspunkte und zur Abscheidung von nicht verdampftem Kältemittel wird hinter dem Verdampfer ein Sammler installiert. Aufgrund der im Betrieb zum Teil stark variierenden Luftkonditionierung und Antriebsdrehzahl, müssen verschiedene Regelmechanismen eingeführt werden. Unterschiedliche Außentemperaturen sorgen bei überkritischen Prozessen für eine Verschiebung des optimalen Hochdrucks der jeweils über die Änderung des Öffnungsquerschnitts des Ventils eingestellt werden kann.

Ein weiterer, hinsichtlich der Regelung des Klimakreislaufs zu beachtender Punkt ist die durch den Fahrbetrieb variierende Verdichterdrehzahl. Um diesen Effekt der variierenden Kälteleistung kompensieren zu können, ist der Verdichter mit einer verdichterin-ternen Regelmechanik ausgerüstet, die das Hubvolumen und damit die Fördermenge über die Stellung der Schwenkscheibe stufenlos variieren kann (siehe [1]). Die Regelung basiert auf einem Momentengleichgewicht, welches um den Schwenkpunkt der Schwenkscheibe im Verdichter aufgestellt wird. Zum Verständnis dieser Regelung wird zunächst die Funktionsweise des regelbaren Verdichters im Ansatz erläutert. Ein regelbarer Schwenkscheibenverdichter wie er in Bild 2 schematisch dargestellt ist, besteht aus einer Saugkammer (SK), in die das Kältemittel aus dem Kältekreislauf angesaugt wird. Das

Kältemittel wird über die Hubräume der einzelnen Kolben verdichtet und gelangt in die Druckkammer (DK).

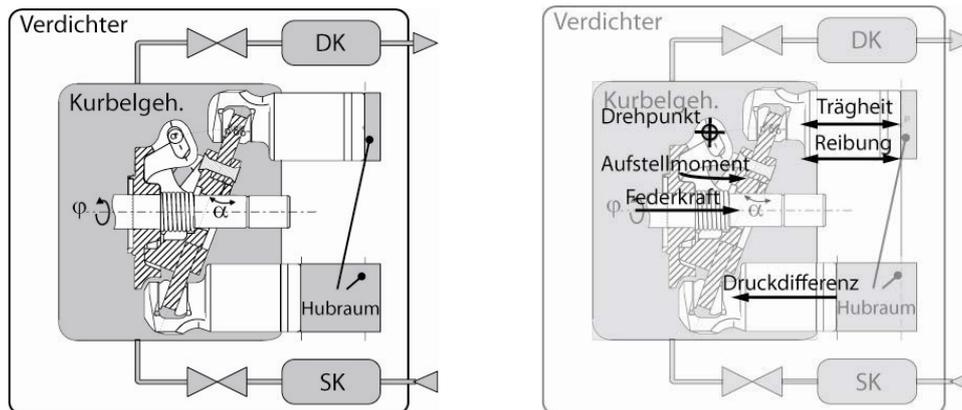


**Bild 1:** Modelica Simulationsmodell eines Kaldampfprozesses mit Ventilregelung für die verdichterinterne Regelmechanik und Hochdruckregelung für das Expansionsventil.

Von dort verlässt der wesentliche Teil des Kältemittels den Verdichter und steht zur Kälteerzeugung zur Verfügung. Ein geringer Teil des geförderten Kältemittels, der Regelmassenstrom, wird über ein Ventil von der Druckkammer in das Kurbelgehäuse geleitet (siehe [8]). Nachdem der Regelmassenstrom das Kurbelgehäuse über ein zweites Ventil verlassen hat, wird dieser in der Saugkammer dem übrigen zu verdichtenden Kältemittel zugemischt. Abhängig vom Druck im Kurbelgehäuse, der entweder über ein Ventil im Einlass oder im Auslass des Kurbelgehäuses geregelt werden kann, wird sich ein Kräftegleichgewicht an der Schwenkscheibe und damit ein bestimmter Anstellwinkel  $\alpha$  der Scheibe einstellen. Der Anstellwinkel der Scheibe ist proportional zum Hub des Verdichters und hat damit einen direkten Einfluss auf den Gesamtförderstrom des Verdichters. Das Kräfte- bzw. Momentengleichgewicht ist von verschiedenen Effekten mehr oder weniger stark abhängig. Mit zunehmender Drehzahl wirkt ein zunehmendes Deviations- bzw. Aufstellmoment auf die Scheibe. Die Trägheit der Kolben mit allen weiteren translatorisch bewegten Massen wirkt an den Gleitpunkten der Kolben auf der Schwenkscheibe und führt zu einem Aufregeln des Verdichters. Die Federkraft kann sowohl aufregelnd als auch abregelnd wirken. Neben der Federkraft als entscheidenden Einflussfaktor ist die Druckdifferenz zwischen Hubraum und dem Kurbelgehäuse ein sehr bedeutender Faktor. Alle diese Faktoren zusammen bilden ein Momentengleichgewicht als Funktion des

Scheibenwinkels  $\alpha$  um den Drehpunkt. Es ist folglich nur eine Einflussnahme auf das Gleichgewicht und somit implizit auch auf den Scheibenwinkel möglich, indem man den Druck im Kurbelgehäuse wie bereits weiter oben erwähnt ändert.

Mit Hilfe der Regelmechanik des Kompressors wird, wie in Bild 1 dargestellt, schließlich über einen zweistufigen Regler, bestehend aus PID Regler für den Sollabregelgrad und einen schnellen Zweipunktregler, der das Regelventil des Kompressors stellt, die Ausblastemperatur des Verdampfers geregelt.



**Bild 2:** Aufbau eines Schwenkscheibenverdichters mit Saugkammer (SK), Druckkammer (DK) (links) und Darstellung der Kräfte und Momente die Einfluss auf die Verdichterregelung nehmen (rechts).

### 3 Aufbau des Verbundes aus Hardware, Echtzeit –und Standardsystemen

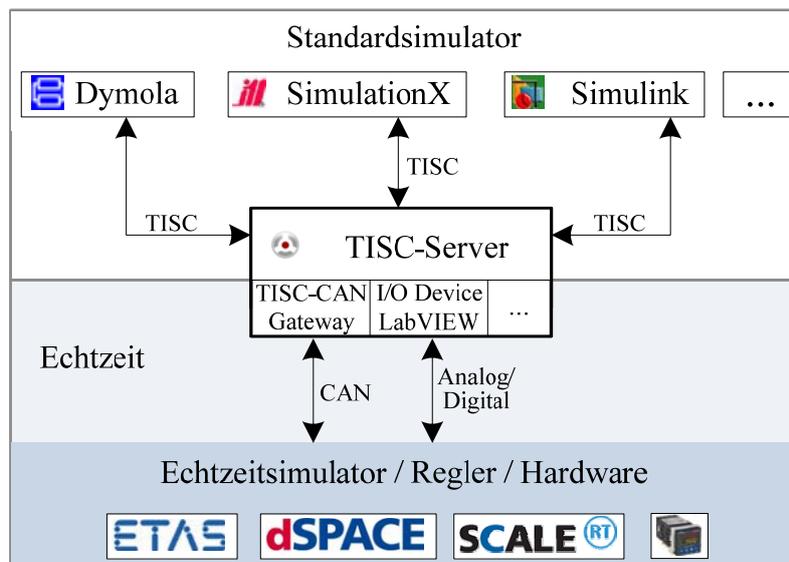
In Kapitel 2 wurde bereits das Gesamtmodell zur Simulation der Klimaanlage mit der Regelung des Hochdrucks sowie der Verdampferausblastemperatur vorgestellt. An dieser Stelle soll der Aufbau des Verbundes und die Verteilung der einzelnen Modellelemente auf die Hardware sowie die Kopplung der Teilsysteme beschrieben werden.

#### 3.1 Allgemeine Vorstellung des Simulationsverbundes

Aufbauend auf der Co-Simulationsumgebung TISC wird die Ankopplung von Echtzeitsimulatoren und realer Hardware an ein bestehendes Simulationsmodell vorgestellt (siehe Bild 3).

Um Simulationsmodelle über TISC mit anderen Modellen und Hardware zu koppeln, werden zunächst geeignete TISC-Schnittstellen in das Modell eingebaut. Über die Schnittstelle werden alle benötigten Daten zur Simulationszeit an TISC übergeben und in diskreten Zeitabständen an die anderen Modelle weitergeleitet (siehe [3][9]). Im Bereich der Offline-Simulation von komplexen Systemen (siehe [5][2]) wird die Kommunikation standardmäßig unabhängig vom Betriebssystem mittels TCP/IP über Ethernet durchgeführt. Zur Ankopplung von Hardware stehen in TISC andere Wege, wie beispielsweise die CAN Schnittstelle, zur Verfügung.

Alle von TISC derzeit unterstützten Standardsimulatoren, wie z.B. MATLAB/Simulink, Dymola, KULI, Flowmaster, Fluent, SimulationX, LabVIEW, ASCET, Star-CD, CFX, OpenFOAM, TRNSYS und THESEUS-FE können im Simulationsverbund benutzt werden. Der TISC-Server stellt die zentrale Schnittstelle zwischen der Echtzeit- und Standardwelt dar. Die Anbindung an Echtzeitsimulatoren, Regler und andere Hardware findet über den CAN-Bus sowie analoge und digitale Signale statt. Die Anbindung an weitere Feldbusse und XCP ist geplant.



**Bild 3:** Über TISC gekoppelter Simulationsverbund aus Hardware, Echtzeit- und Standardsimulatoren.

Die Ankopplung an CAN wurde mittels eines TISC-CAN Gateways realisiert, welches für den Server als normaler Client sichtbar ist. Basierend auf der C-API einer Standard CAN-Karte der Firma Softing AG und dem C-Interface der TISC-Middleware, wurde ein Gateway implementiert, welches die über TISC empfangenen Nachrichten über CAN versendet und die empfangenen CAN-Nachrichten an die Middleware übergibt. Der CAN-Bus kann mit einer beliebigen Cycle-Time betrieben werden, allerdings werden die auszutauschenden Werte nur dann aktualisiert, wenn der CAN-Gateway vom TISC-Server synchronisiert wird. Um analoge und digitale Signale über TISC ansprechen und auswerten zu können, wurde auf eine handelsübliche I/O-Karte zurückgegriffen. Diese wird in LabVIEW angesprochen und die Daten werden über die TISC-LabVIEW Schnittstelle ausgetauscht. Dadurch können alle in LabVIEW verwendbaren I/O Karten an TISC angekoppelt werden. Durch die geschaffenen Schnittstellen können für Hardware in the Loop (HiL) und Rapid Control Prototyping (RCP) (siehe [7]) beliebige Echtzeitplattformen, wie z.B. Simulatoren von ETAS, dSPACE sowie SCALE-RT und Opal-RT eingesetzt und an die Standardsimulatoren angekoppelt werden (siehe Bild 3).

### 3.2 Echtzeitaspekte

Um den harten Zeitanforderungen von realer Hardware und Echtzeitsimulatoren zu genügen, müssen die verwendeten Modelle, welche in Standardsimulatoren ausgeführt werden, hinreichend schnell sein. Mit hinreichend schnell ist in diesem Fall gemeint, dass das Ergebnis der Berechnung für die Ausgänge eines Modells für eine Sekunde Simulationszeit in weniger als einer Sekunde realer Zeit vorliegt. Ist das Ergebnis nicht rechtzeitig vor Beginn des nächsten Zeitschritts verfügbar, erhalten die Modelle einen veralteten Wert und die Simulation ist unter Umständen unbrauchbar.

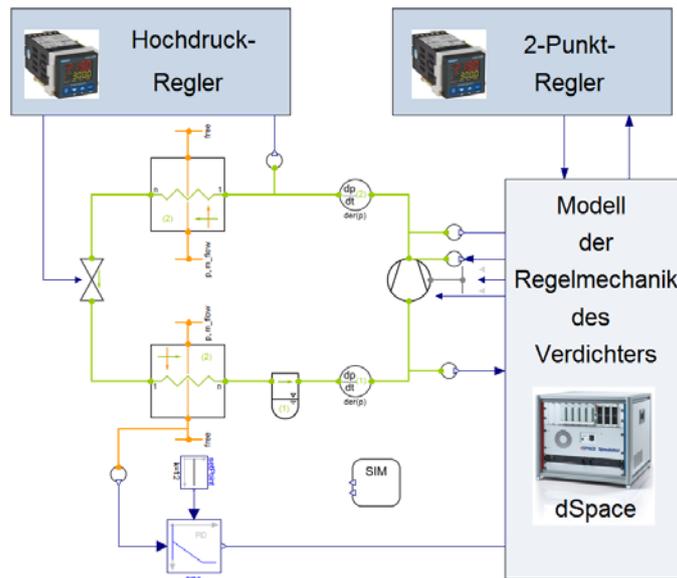
Bei der Arbeit mit Standardsimulatoren kann eine Verletzung der Zeitanforderungen nicht verhindert werden, da das Betriebssystem einer Simulation die Verfügbarkeit von Ressourcen nicht zusichern kann. Ein Prozess mit hoher Priorität oder ein Ereignis wie das Einlegen einer CD kann die Simulation verlangsamen. TISC muss das Einhalten der Zeitbedingungen überwachen und im Fehlerfall eine Warnung ausgeben. Der Anwender muss später darüber entscheiden, ob das Simulationsergebnis aufgrund nicht eingehaltener Zeitbedingungen unbrauchbar ist. Der vorgestellte Simulationsverbund kann also zur Simulation mit harten Echtzeitbedingungen benutzt werden.

Damit ein Modell schnell genug für eine Simulation im Verbund ist, müssen zu jeder Zeit alle Zeitbedingungen eingehalten werden. Doch gerade während der Initialisierungsphase sind Modelle oftmals langsam. Das wählen geeigneter Startwerte und Modellparameter kann den Rechenaufwand, insbesondere während der Initialisierungsphase, stark verringern (siehe [2])

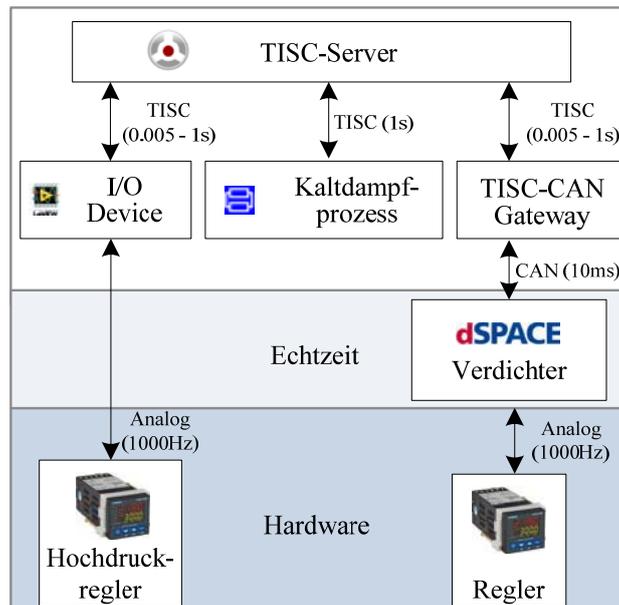
### 3.3 Der Simulationsverbund am Beispiel einer Klimaanlage

Das hochgradig nichtlineare aber hinreichend effiziente Modelica-Modell des Kaldampfprozesses wird in Dymola, einem Standardsimulator, ausgeführt.

Dieses Modell ist ursprünglich für das Systemdesign konzipiert worden, kann aber aufgrund seiner numerischen Effizienz und der beschriebenen physikalischen Dynamik mit vergleichsweise großen Zeitkonstanten im Sekundenbereich für die Anbindung an Hardware herangezogen werden. Das Modell der Verdichterregelmechanik besitzt dagegen kleine Zeitkonstanten im Bereich von Millisekunden, sodass dieses Modell auf eine Echtzeitumgebung exportiert und dort ausgeführt wurde. Die gekoppelten Modelle von Verdichterregelmechanik und Kaldampfprozess bilden in dieser Anwendung die Regelstrecke ab. Zwei reale Regler werden mit der simulierten Regelstrecke gekoppelt. Ein realer PID-Regler steuert den Hochdruck des Kreislaufes. Stellgröße ist der Öffnungsquerschnitt des Expansionsventils. Ein realer Zwei-Punkt-Regler stellt ein im Verdichterregelmechanik eingebautes Ventil (siehe Abschnitt 2) ein. Die Regelgröße ist die Lufttemperatur am Verdampferaustritt. Realisiert wurde dies mit einem übergeordneten simulierten PID-Regler, welcher den Sollwert für die Stellung der Schwenkscheibe im Verdichter vorgibt. Der reale Zwei-Punkt-Regler regelt durch Öffnen und Schließen des internen Verdichterventils im Millisekundenbereich die Stellung der Schwenkscheibe auf den vorgegebenen Sollwert. Das an den Simulationsverbund angepasste Modell ist in Bild 4 dargestellt. Als Echtzeitsimulator kommt ein HIL System der Firma dSPACE (DS1006) zum Einsatz. Das Modell der Verdichterregelmechanik wurde in MATLAB/Simulink erstellt und unter Verwendung von ControlDesk auf das Echtzeitsystem geladen. Der Regler zur Steuerung der Verdichterregelmechanik wird direkt an das dSPACE System angeschlossen.



**Bild 4:** Das Modelica Simulationsmodell einer mit TIL modellierten Klimaanlage mit einem auf die dSPACE ausgelagerten Modell der Verdichterregelmechanik.



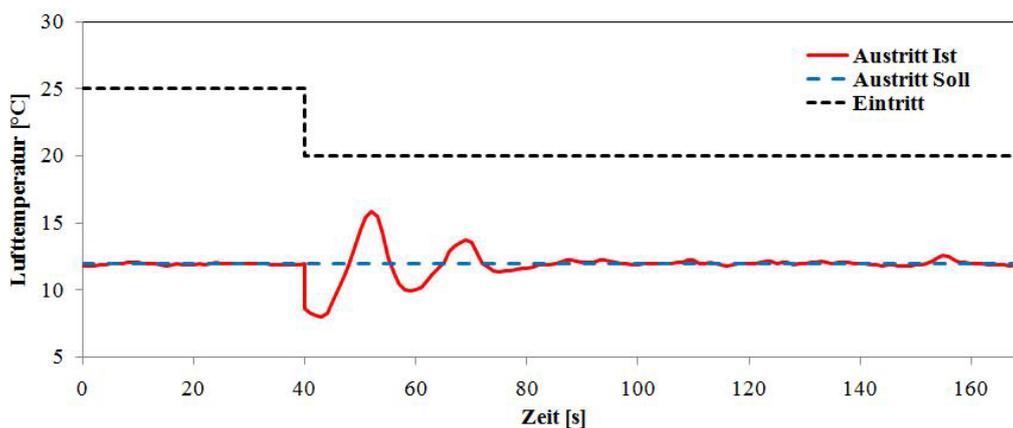
**Bild 5:** Simulationsverbund bestehend aus Hardware, Echtzeit- und Standardsimulatoren am Beispiel einer Klimaanlage.

Dazu wurde die Schnittstellenkarte DS2202 verwendet. Der Regler ist direkt mit dem DS2202 verbunden, da der Regelprozess mit sehr kleinen Zeitkonstanten durchgeführt werden muss. Zum Datenaustausch mit dem Kaldampfprozessmodell in Dymola werden

alle benötigten Simulationsdaten über den CAN-Bus ausgetauscht. Das Modell des Verdichters wird auf dem Echtzeitsystem mit einer Zeitkonstante von 1 Millisekunde ausgeführt. Der extern an die dSPACE angeschlossene Regler wird kontinuierlich mit der gleichen zeitlichen Auflösung angesprochen. Der TISC-CAN-Gateway ist mit einer Zeitkonstante von einer Sekunde an den Server angebunden, die Daten werden demnach einmal pro Sekunde mit dem Dymola Modell ausgetauscht. Im Bedarfsfall kann die Austauschrate aber auch auf bis zu 0.005s herabgesetzt werden. Zur Ansteuerung des Hochdruckreglers wurde ein LabVIEW Modell erstellt, welches ebenfalls mit einer Zeitkonstante von einer Sekunde an den Verbund angeschlossen ist.

## 4 Simulationsergebnisse

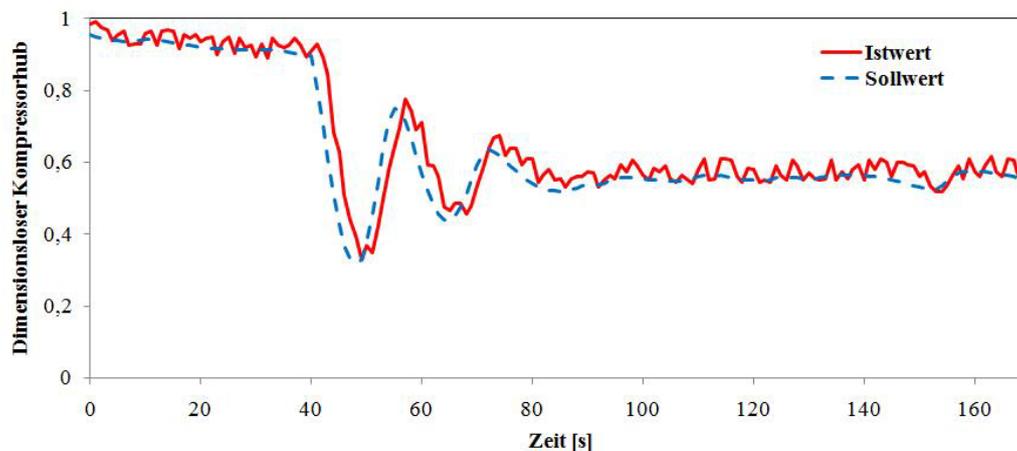
Als Testfall wird ein Sprung auf die Lufttemperatur am Verdampfeintritt von 25°C auf 20°C simuliert. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. In Bild 6 ist der Verlauf der Lufttemperatur am Verdampfeintritt und –austritt dargestellt. Zum Zeitpunkt 40s wird ein Sprung auf die Eintrittstemperatur gegeben. Die Regelung bewirkt zunächst ein starkes Überschwingen der Regelgröße Austrittstemperatur. Nach etwa 40s ist wieder der Sollwert von 12°C erreicht.



**Bild 6:** Sprungantwort der Lufttemperatur am Verdampferaustritt auf eine Temperaturänderung der Luft am Verdampfeintritt.

In Bild 7 ist der zugehörige Verlauf des dimensionslosen Verdichterhubs dargestellt. Der Sollwert kommt von einem übergeordneten simulierten PID-Regler. Der tatsächliche Istwert wird auf dem dSpace-System in Kombination mit dem realen Zwei-Punkt-Regler berechnet (siehe Abschnitt 3). Man erkennt, dass der Istwert mit einer gewissen Verzögerung dem Sollwert folgt. Die hochfrequenten Schwingungen kommen durch die Charakteristik des Zwei-Punkt-Reglers zu Stande.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Regelung grundsätzlich funktioniert. Allerdings müssen die Regelparameter noch besser angepasst werden, um die Schwingungen der Lufttemperatur am Verdampferaustritt zu verringern oder ganz zu verhindern. Hierfür stellt der vorgestellte Simulationsverbund ein ideales Werkzeug dar.



**Bild 7:** Vgl. des relativen Hubvolumens mit dem im Modell berechneten Sollwert.

## 5 Danksagung

Der heterogene Verbund aus Simulatoren und Hardware sowie eine echtzeitfähige Modellbibliothek wird mit Kunden und im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes „TEMO-Thermische Echtzeitfähige Modelle“ weiter entwickelt. Partner dieses Verbundprojektes sind TLK-Thermo GmbH, ITI GmbH und die TU Braunschweig mit den Instituten für „Thermodynamik“ und „Software System Engineering“.

## 6 Literatur

- [1] *Cavalcante, P.; Försterling, S.; Tegethoff, W.; Stulgies, N., Köhler, J.:* Transient Modeling and Sensitivity Analysis of a Controlled R744 Swash Plate Compressor. Proceedings: 19th International Compressor Engineering Conference, Purdue, West Lafayette, IN, USA, July 14-17, 2008.
- [2] *Kossel, R.; Strupp, N.C.; Tegethoff, W.:* Effects of Tool Coupling on Transient Simulation of a Mobile Air-Conditioning Cycle, Proceedings of the 6th International Modelica Conference, Como, 2009.
- [3] *Kossel, R.; Tegethoff, W.; Bodmann, M.; Lemke, N.:* Simulation of complex systems using Modelica and tool coupling. *Proceedings of the 5th International Modelica Conference*, pp.485-490. Vienna. 2006.
- [4] *Lorentzen, G. und Pettersen, J.:* A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning. *International Journal of Refrigeration*, Vol 16 No 1, 1993, S. 4-12.
- [5] *Lund, C.; Maister, W.; Lange, C.; Beyer, B.:* Innovation durch Co-Simulation! Tagungsbeitrag in *Wärmemanagement des Kraftfahrzeuges VI*, Haus der Technik Fachbuch 93, Expert Verlag, ISBN 3-8169-2820-1, 2008, S. 163-187.

- [6] *Richter, C.*: Proposal of new object-orientated equation-based model libraries for thermodynamikc systems. Dissertation TU Braunschweig, 2008.
- [7] *Richert, F.; Hoffmann, K.; Bollig, A.; Abel D.*: *Rapid Control Prototyping mit Dymola und Matlab für eine Modellgestützte Regelung in der Motorsteuerung*, VDI-Berichte, VOL 1092, 2006.
- [8] *Stulgies, N. et al.*: Standardisierte Regelventile hoher Effizienz für mobile Klimasysteme. Vorschläge zur effizienten Erprobung der Komponenten. DKV-Tagung, Hannover, 2007.
- [9] *Tegethoff, W.; Correia, C.; Kossel, R.; Bodmann, M.; Lemke, N. und Köhler, J.*: Co-Simulation und Sprach-Standardisierung am Beispiel des Wärmemanagements. Tagungsbeitrag in Wärmemanagement des Kraftfahrzeuges V, Haus der Technik Fachbuch 68, Expert Verlag, ISBN 3-8169-2651-1, 2006, S. 231-242.

# **Konzept für die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Erstellung von Energieszenarien für Ho Chi Minh City**

Nguyen Xuan Thinh, Doreen Rahe, Anne Bräuer und Verena Teucher  
Ng.thinh@ioer.de, d.rahe@ioer.de, a.braeuer@ioer.de, v.teucher@ioer.de  
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung  
Weberplatz 1, 01217, Dresden

## **Kurzfassung**

Der vorliegende Beitrag stellt ein Konzept für die Entwicklung eines Simulationsmodells vor, um Energieszenarien für die Megastadt Ho Chi Minh City (HCMC) zu erstellen. Die Arbeit wurde im Rahmen des BMBF-Projektes „Megacity Research Project TP. Ho Chi Minh“ geleistet. Dieses Projekt wird von der BTU Cottbus koordiniert und soll eine Laufzeit von 5 Jahren, von August 2008 bis Juli 2013, haben. Durch die Auswertung internationaler Literatur konnte eine nützliche Übersicht über Modellierungsansätze und deren Relevanz für HCMC sowie entscheidende Einflussfaktoren für den Energieverbrauch in Städten gewonnen werden [4]. Des Weiteren wird über den Aufbau einer Geodatenbasis für die Modellierung des räumlichen Energieverbrauchsmusters für HCMC berichtet. Es enthält u. a. sozio-ökonomische Daten und die räumliche Verteilung und Anordnung von Gebäuden, welche wichtig für die Entwicklung von Stadtstrukturtypen und für die Untersuchung von klima- und energieeffizienten Stadtstrukturen in HCMC sind. Unser Modellierungsansatz basiert auf den für HCMC entwickelten Stadtstrukturtypen und deren spezifischen Energiekenngrößen. Darauf aufbauend und anhand erarbeiteter Zusammenhänge wird ein Simulationsmodell erstellt. Dieser Beitrag stellt den Stand der Modellentwicklung vor.

## **1 Einleitung**

Mit etwa 8 Millionen Einwohnern und einem jährlichen Wirtschaftswachstum von mehr als 10 % sowie einer boomenden Bautätigkeit verbraucht Ho Chi Minh City (HCMC) jedes Jahr etwa ein Viertel des gesamten Energiekonsums in Vietnam. In einer so dynamischen entwickelten Megastadt bestimmt eine Vielzahl von Determinanten Höhe und Struktur des Energiebedarfs. Neben saisonalen und wetterabhängigen Faktoren beeinflussen v. a. die Bevölkerungszahl, die Größe und die räumliche Verteilung der Wohngebäude (Wohnfläche), die Anzahl der Kraftfahrzeuge und ihre Fahrleistungen, die wirtschaftliche Produktion, aber auch Energieeinsparung und rationelle Energieverwendung das Niveau des Energieverbrauchs. Das Thema Energie und Energieverbrauch einer hochdynamischen Megastadt wie HCMC ist besonders interessant im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung und vor dem Hintergrund der immer knapper werdenden

fossilen Rohstoffe. Aufgrund der Knappheit fossiler Energieträger und der schon heute spürbaren Engpässe auf den Weltenergiemärkten muss eine nachhaltige Energiepolitik die Entwicklung energieeffizienter Strukturen unterstützen und umsetzen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat innerhalb seines Förderprogrammes „Sustainable Development of the Megacities of Tomorrow“ das von der BTU Cottbus koordinierte Projekt „Megacity City Research TP. Ho Chi Minh“ mit einer Laufzeit von fünf Jahren im Juli 2008 bewilligt. An diesem Projekt ist das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) durch die Bearbeitung von zwei Arbeitspaketen (Urban Flooding und Urban Energy) beteiligt (BTU Cottbus 2007 [1], Storch & Schmidt 2008 [2]). Ziel des IÖR-Beitrages zur Teilaufgabe „Urban Energy“ ist es, gemeinsam mit vietnamesischen Partnern die räumliche Verteilung des Energieverbrauches im Wohnsektor von Ho Chi Minh City (HCMC) zu ermitteln, die Energieerzeugung sowie die Energieträgerstruktur von HCMC zu erfassen und zu analysieren sowie Energieszenarien für HCMC zu entwickeln. Dazu ist ein Simulationsmodell aufzubauen. In diesem Rahmen soll der Stand der Modellentwicklung vorgestellt werden.

## **2 Modellierung des Energieverbrauchs – Grundlagen für das Simulationsmodell**

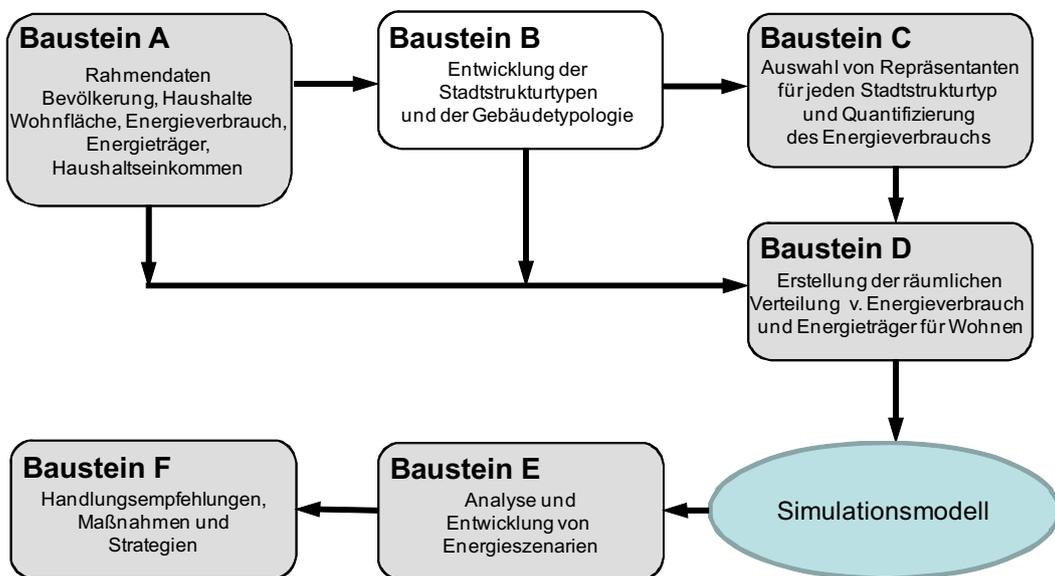
Gemeinsam mit vietnamesischen und deutschen Partnern wurden und werden energie-relevante Rahmendaten über Wohnbevölkerung, Haushalte, Einkommen und Energieverbrauchsstruktur in HCMC sowie statistische Energiedaten von HCMC und Vietnam beschafft, um Indikatoren für das Untersuchungsgebiet HCMC zu entwickeln. Die angestrebten Indikatoren, welche für das WP Urban Energie und auch für das Gesamtprojekt eine wichtige Bedeutung haben, sind die räumliche Verteilung von Haushalten mit unterschiedlichen Einkommensniveaus, der flächenspezifische Energieverbrauch der Stadtstrukturtypen und der flächenspezifische Energieverbrauch verschiedener Gebäudetypen. Bei der Beschaffung der Daten sind das Energy Conservation Research and Development Center HCMC (ENERTEAM) und das USSH Department of Geography sowie Projektmitglieder vom WP Adaptation Planning Framework, WP Urban Energy und WP Energy- and Climate Efficient Housing Typologies beteiligt.

Entscheidende Datengrundlage für die genannten Indikatoren sind Stadtstrukturtypen und die Gebäudetypologie von HCMC, welche zurzeit vom Projektteam des WP Adaptation Planning Framework (BTU Cottbus) entwickelt werden. Ebenfalls eine wichtige Bedeutung haben die digitalen Daten über Gebäudegrundrisse, die gegenwärtig vom IÖR-Projektteam für WP Urban Flooding und WP Urban Energy extrahiert werden.

Die digitalen Flächennutzungsdaten wurden vom Department of Natural Resources and Environment HCMC (DoNRE) zur Verfügung gestellt. Des Weiteren sind Daten über die zukünftige Wirtschafts-, Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung sowie Daten über den Markt von Haushaltsgeräten, vor allem Klimaanlage, Daten über erneuerbare Energien und räumliche Wind- und Temperaturdaten von HCMC für die Modellierung des Energieverbrauchs von essenzieller Bedeutung. Derartige Daten und vor allem die Stromverbrauchsdaten der Haushalte in verschiedenen Stadtstrukturtypen und Gebäudetypen sollen mit tatkräftiger Unterstützung von vietnamesischen Partnern, vor allem ENERTEAM und USSH, beschafft bzw. durch Befragungen erhoben werden.

Waibel (2009) [3] hat Anfang 2009 das Einkommen und den Stromverbrauch von 409 Haushalten in HCMC durch eine Befragung erhoben und dem WP Urban Energy zur Verfügung gestellt.

Die Arbeiten zum Arbeitspaket „Urban Energy“ lassen sich sechs Bausteinen zuordnen (Bild 1). Eine brauchbare Typisierung des Wohngebäudebestandes ist wichtig für die Quantifizierung des flächenspezifischen Energieverbrauchs jedes Stadtstrukturtypen. Diese Typisierung hat energierelevante Rahmenbedingungen aus dem Baustein A zu berücksichtigen, z. B. Energieträger und Haushaltseinkommen. Plausible und klare Anforderungen an die Entwicklung bzw. Kartierung der Stadtstrukturtypen müssen als Kriterien begründet und festgelegt werden. Die Kartierung wird anhand von Radar- und Satellitendaten unterstützt.



**Bild 1:** Übersicht der Arbeitsschritte bzw. Bausteine zur Entwicklung des Simulationsmodells.

Zusammenhänge zwischen ausgewählten Rahmendaten und dem Energieverbrauch sind anhand der Erkenntnisse aus den Bausteinen A, C und D herauszuarbeiten und in einem Simulationsmodell zu formulieren, um Szenarien entwickeln zu können. Die unabhängigen Input-Variablen des Simulationsmodells sind im Rahmen mehrerer Vorort-Expertenworkshops zu diskutieren und festzulegen. Ein erster Workshop wird sich mit Stadtentwicklungsszenarien für den Bereich Wohnen und Bevölkerung beschäftigen, ein zweiter Workshop wird die Lokalfachexperten der Energieerzeugung befragen. In einem Kreativ-Workshop mit Vertretern von Politik und Wissenschaft sollen alternative Entwicklungspfade und Visionen entwickelt werden.

Auf der Grundlage der in den Szenarien festgestellten Stellschrauben können Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die den lokalen Kontext (Tradition, Gesetze, Vorschriften, Klima usw.) berücksichtigen. Deshalb soll dieser Arbeitsschritt im Wesentli-

chen von den vietnamesischen Projektpartnern übernommen werden. Mögliche Handlungsfelder beziehen sich auf städtebauliche Maßnahmen (Lage und Dichte von Wohnbebauung, Funktionsmischung), Verbraucherverhalten und energieeffiziente Gebäudearchitektur und dezentrale und emissionsarme Energieerzeugung. Der Baustein F wird in enger Zusammenarbeit mit dem Gesamtteam des Projektes bearbeitet.

Im Folgenden wird über die Gebäudetypologie und vor allem über die Extraktion von Gebäudegrundrissen in HCMC berichtet. Diese Daten liefern wichtige Grundlagen für die Entwicklung des Simulationsmodells.

### 3 Gebäude von HCMC

Für die Modellierung der aktuellen Energienutzung und des zukünftigen Verbrauchs ist die Kenntnis der Gebäudetypen wichtig. Anhand der Typisierung kann für eine Großstadt wie HCMC ein Muster des Verbrauchs projiziert werden. Das Baualter, die konstruktionsbedingte Verteilung der Fensterflächen, sowie die Geschosshöhe und die Innenraumgröße geben Hinweise auf den Energieverbrauch. Aufgrund des subtropischen Klimas in HCMC ist die Raumheizung nicht relevant. Dagegen nimmt die Anzahl der Klimaanlageanlagen zur Raumkühlung mit steigendem Lebensstandard zu. Die verstärkte Nutzung dieser Geräte überlastet heute schon die Strombereitstellung.

Die Gebäudetypologie in HCMC ist im Wesentlichen auf ein übersichtliches Spektrum von Architekturstilen der vergangenen Epochen begrenzt. Neben einzeln stehenden Gebäuden der französischen Kolonialzeit (ehemaliges Rathaus, Hauptpostamt, repräsentative Gebäude) und Büro-Hochhäusern neueren Datums, zeigen die meisten Gebäude in HCMC oft das gleiche Muster, welches sich an den ursprünglichen Typ des „Chinese Shophouse“ anlehnt (Martin, V., 2001). Die schmale Straßenfront beträgt nur 4 Meter. In die Tiefe ragen die Häuser dann 15-20 Meter. Die schmale straßenseitige Bebauung gründet sich auf die hohen Steuern, die entlang der Straßen für diese Häuser veranschlagt werden. Mit der engen, in die Tiefe ausgerichteten Bebauung sind auch Probleme für Belichtung und Belüftung verbunden (Wüst, S. 2001). Die allgemeinen Baumaterialien sind Beton, Holz und Ziegel. Die Gebäudehöhe differiert, der dominante Haustyp im „Chinese-Shophouse“ Stil im Neubaubereich kann bis zu 6 Etagen haben. Im Erdgeschoss befinden sich traditionell meist Geschäfte und Restaurants (im Stadtzentrum), oder Werkstätten und Läden (Peripherie). Die Gebäude unterliegen demnach meist einer Mischnutzung mit Geschäftsbereich im Erdgeschoss und Wohnnutzung in den oberen Etagen. Die Fassaden sind zur Straße ausgerichtet, die Wohnbereiche allerdings rückwärtig durch Zuwege erschlossen. Diese kleinteilige Bebauung ermöglichten Einwohnerdichten von bis zu 40.000 EW /Km<sup>2</sup> in der Vergangenheit, heute sind noch 24.000EW/Km<sup>2</sup> zu finden.

Aufstockungen des vorhandenen „Shophouse“-Typ setzten in den 1990er Jahren mit dem wirtschaftlichen Aufschwung ein. Aus ehemals 2 oder 3 stöckigen Gebäuden entstanden nun Gebäude mit bis zu 8 Etagen, teilweise untervermietet. Auf dem Immobilienmarkt werden diese Häuser mit „4/15 house“ oder „4/20 house“ betitelt, nach ihrer Breite und Tiefe.

Die ehemals aus Nordvietnam stammenden Einwohner HCMC's mit überwiegend landwirtschaftlichem Hintergrund brachten einen Haustyp vietnamesischer Bautradition

mit, der als Pfahlbau angelegt war und nur ein erhöhtes Geschoss hatte. Eine gewerbliche Nutzung der einzeln stehenden Häuser war nicht vorgesehen. Das Wohnhaus mit ländlichen Wurzeln ist der zweithäufigste Typ in HCMC (Wüst, S. 2001).

Die zwei weiteren, eher selten vorkommenden Wohnhaustypen sind das freistehende koloniale Haus (Villa) und der Mietwohnungsbau. Die Mietwohnungen nehmen weniger als 5% auf dem Wohnungsmarkt ein. Die Mieteinheiten wurden zur Kolonialzeit oder nach 1975 errichtet.

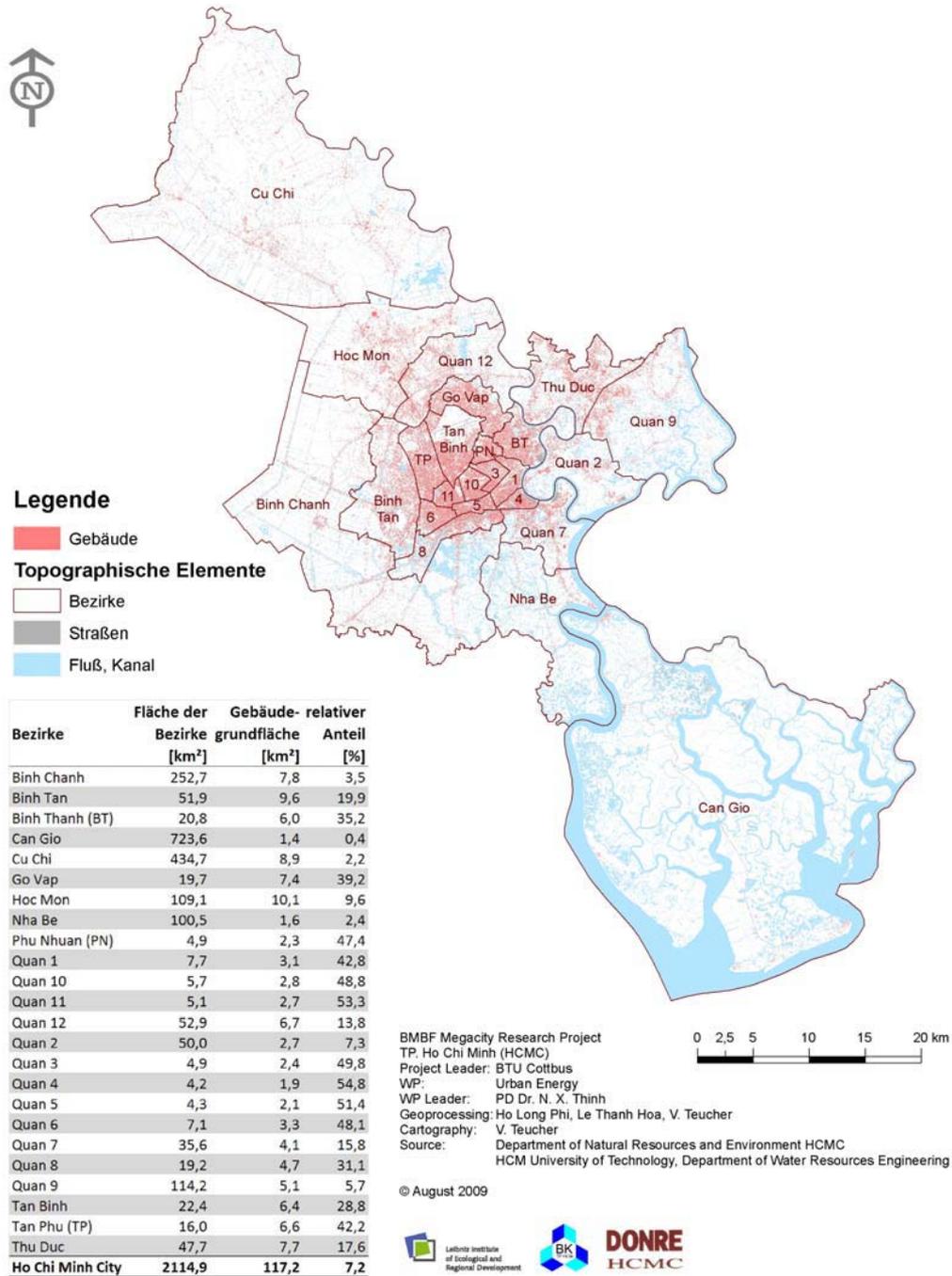
Laut Statistik aus Mitte der 90er Jahre leben 6% der Bevölkerung HCMC's in Armutsvierteln (Wüst, S. 2001). Die Behörden haben 67.000 behelfsmäßige Wohnbauten gezählt, von denen viele direkt an Kanälen liegen. Der von der Stadt ins Leben gerufene Bau neuer Geschosswohnungen und die damit einhergehenden Zwangs-Umsiedlungen sind ein Teilaspekt des Problems, denn die Nutzung in den neuen Unterkünften ist nicht für Gewerbe vorgesehen. Der direkte Zugang zur Straße fehlt und somit ist den dort lebenden Menschen die Möglichkeit genommen, mit den Geschäften, die sie vor der Umsiedlung ausübten fortzufahren. Die Verschlechterung der Arbeitsmöglichkeiten geht auf das sich auflösende Netz sozialer Kontakte, Kaufen und verkaufen, Produktion und Dienstleistung zurück. Die Lebenshaltungskosten steigen aber die Verdienstmöglichkeiten sind reduziert. Eine neuere Erscheinung ist die, dass ehemals zwangsumgesiedelte Familien aus den zugewiesenen Wohnungen ausziehen und sich am Stadtrand kleine Hütten errichten mit unerlaubtem Zugang zu den Ver- und Entsorgungsnetzen. Auf diese Weise können die Familien ihre Lebenshaltungskosten wieder verringern.

#### **4 Gebäudegrundrisse in HCMC**

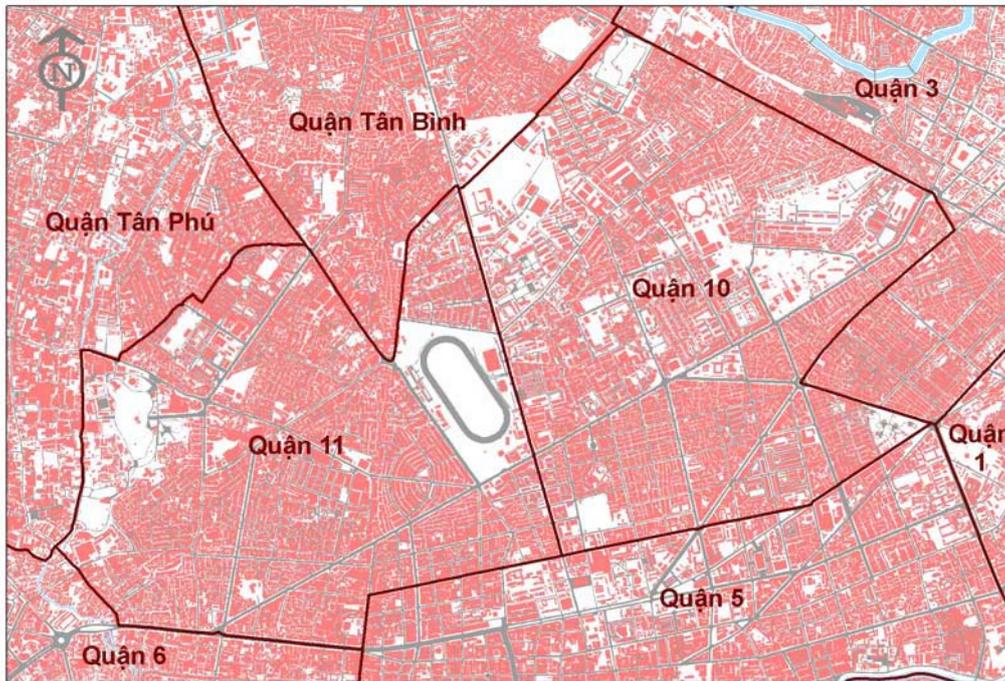
Zur Modellierung von Energiebedarf und Energieverbrauch ist es wichtig, die räumliche Verteilung und Anordnung von Gebäuden zu kennen. Dafür stehen dem IÖR-Team GIS-Daten zur Verfügung, welche durch aufwendige Analysen bearbeitet werden mussten. Das betrifft die Übersetzung der Attributinformationen vom Vietnamesischen ins Englische bzw. Deutsche, die Ergänzung von weiteren Nutzungsinformationen und die Korrektur von Geometriefehlern. Aus den vorhandenen Grundrissen wurden diejenigen ausgewählt für die eindeutig eine Gebäudenutzung ausgewiesen wurde, d. h. Datenobjekte, deren Nutzungsbezeichnung „Hof“, „Markt“, „Platz“, „Sportplatz“, „Friedhof“ etc. lautete, wurden ausgeschlossen, so dass ein reiner Gebäudedatensatz entstand.

Der Datensatz zeigt in der Verteilung der Gebäude eine starke Konzentration auf die zentralen Bezirke von Ho Chi Minh City, während die Randbezirke nur sehr schwach besiedelt sind (siehe Bild 2). Im Zentrum nehmen allein die Gebäude 40 bis 60 % der Grundfläche des Bezirkes (ohne Gewässerfläche) ein. Außerhalb liegt der relative Anteil bei weniger als 10 %, was nicht nur der geringen Gebäudeanzahl, sondern auch der Größe der ländlichen Bezirke geschuldet ist.

## Gebäudegrundrisse von Ho Chi Minh City nach Bezirken



**Bild 2:** Übersicht der Gebäudeflächenverteilung in Ho Chi Minh City.



**Gebäudegrundrisse ausgewählter zentraler Bezirke von Ho Chi Minh City**

**Legende**

 Gebäude

**Topographische Elemente**

 Fluß, Kanal

 Straßen

 Quận-Grenzen



BMBF Megacity Research Project  
 TP. Ho Chi Minh (HCMC)  
 Project Leader: BTU Cottbus  
 WP: Urban Energy  
 WP Leader: PD Dr. N. X. Thinh  
 Geoprocessing: Ho Long Phi, Le Thanh Hoa, V. Teucher  
 Cartography: V. Teucher  
 Source: Department of Natural Resources and Environment HCMC  
 HCM University of Technology, Department of Water Resources Engineering

© August 2009



**Bild 3:** Gebäudeflächenverteilung in ausgewählten zentralen Bezirken von Ho Chi Minh City.

Die hohe Gebäudedichte im Zentrum sorgt, mit den übrigen versiegelten Flächen, für ein schlechtes Stadtklima. Diese Bereiche heizen sich, bei den ohnehin hohen Tagestemperaturen, schneller auf. Genauso wird eine gute Durchlüftung durch die engstehenden Gebäude verhindert (siehe Bild 3). Daher ist hier der Drang bzw. Wunsch zur Gebäudekühlung mit Klimaanlage besonders hoch, was wiederum zu einem erhöhten Energiebedarf und Energieverbrauch in den zentralen Bezirken führt.

## 5 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Weiterhin bedanken wir uns für die wertvollen Unterstützungen von Nguyen Thi Cam Van (DoNRE HCMC), Ho Long Phi (HCMC UT) und Le Thanh Hoa (USSH HCMC).

## 6 Literatur

- [1] *Brandenburg University of Technology Cottbus (BTU):* Adaptation Planning Framework to Climate Change for Urban Environment and Development in Ho Chi Minh City. BMBF Research Proposal. (2007).
- [2] *Martin, V.:* Die Häuser von Saigon. StadtBauwelt Heft 36.S.30-39. (2001).
- [3] *Storch, H.; Schmidt, M.:* Adaptation Planning Framework to Climate Change for the Urban Environment in Ho Chi Minh City. In: In: Möller, A.; Page, B.; Schreiber, M. (Eds.) : Environmental Informatics and Industrial Ecology, EnviroInfo 2008. 22nd International Conference on Informatics for Environmental Protection, Leuphana University Lueneburg, Germany. Aachen : Shaker, (2008), S. 623-630.
- [4] *Thin, N. X.; Rahe, D.; Le Hoang Viet, Pham Thuy Duong:* Approaches to modelling of urban energy and adaptation for analysis of household energy consumption in Ho Chi Minh City. In: Gnauck, A. (Hrsg.): Modellierung und Simulation von Ökosystemen. Aachen Shaker Verlag, im Druck, (2009).
- [5] *Waibel, M.:* Survey of households in HCMC (personal communication). (2009).
- [6] *Wüst, S.:* Die Metropolisierung von Ho Chi Minh Stadt. StadtBauwelt Heft 36.S.40-49. (2001).

# The obtaining of the energy characteristics models of power plant units on the basis of thermal testing results

Elena Merzlikina  
MerzlikinaYI@mpei.ru, aldamar@gmail.com  
Moscow Power Engineering Institute,  
Automatic Control Systems for Heat Processes Department  
Krasnokazarmennaya, 14, 111250 Moscow, Russian Federation

## Abstract

The paper is devoted to the problem of obtaining energy characteristics models of power plant units on the basis of thermal testing results and advantages and disadvantages of the method under consideration.

The topic of energy characteristics simulation, particularly, the dependence of fuel consumption on electric power and heat load for co-generating units and the dependence of fuel consumption on electric power for condensing units, is very important in Russia nowadays. The problem of energy and fuel saving has been urgent since the transfer to the market economy, so it is important to solve the problem of load distribution optimization between units of a power plant [1,2]. But this problem cannot be solved without accurate and reliable models of the energy characteristics of the power plant units. Energy characteristics are widely used when solving the load distribution optimization problems, calculating engineering-and-economical performance and so on.

Traditionally, the following models are used [2]:

for condensing units

$$B(N_s) = A_0 + A_1 * N_s + A_2 * N_s^2 \quad (1)$$

for co-generating units

$$B(N_s, Q_m) = A_0 + A_1 * N_s + A_2 * Q_m + A_{11} * N_s^2 + A_{22} * Q_m^2 + A_{12} * Q_m * N_s \quad (2)$$

$B$  - the fuel consumption of the unit;  $N_s$  - the electric power of the unit;  $Q_m$  - the heat load of the unit;  $A_i$  - coefficients of the model.

As a rule, it is necessary to take into account some other factors, for example, characteristics of the fuel, outside air temperature, feedwater temperature, auxiliary equipment mode of working and so on [4]. So, it is better to use a more complicated model or an individual model for each mode of working, but it is not always possible to obtain them. Nowadays the energy characteristics are obtained for a particular mode of working, if the mode is slightly different, correction must be made. Sometimes it is possible to obtain the characteristic as a multifactor model, in which not only the heat and electric load, but also some other factors mentioned above are taken into consideration.

There are three ways of obtaining data for the unit model: active experiment, passive experiment and obtaining the model on the basis of thermal testing results. Each of them

has some advantages and disadvantages. The latest is, in fact, a kind of active experiment, but it is better to consider it separately.

Each of the methods has some advantages and disadvantages.

During the passive experiment, we do not interfere into the technological process, we just observe and record the data. This is the advantage of the method, because every power plant should work according to a certain operations schedule. But the passive experiment can be carried out efficiently only when the unit is equipped with a modern industrial control system, but it does not often take place. Moreover, the passive experiment results are less accurate than the results of the active experiment with the same experiment size. In order to obtain the same accuracy the experiment size for the passive experiment must be much bigger than for the active one.

Active experiment means that we interfere into the technological process. It is almost impossible at working power plants in Russia, that is why it is used on pilot units or in some special cases.

Sometimes it is necessary to use the thermal testing results for the model obtaining, because no other data are available. The thermal testing is usually carried out every five years and the results of it are always available at any power station, so we can use them for obtaining the necessary models. The disadvantage of the method is the fact, that the accuracy of the thermal testing results is not anyhow estimated, so it is almost impossible to estimate the accuracy of the models obtained. Moreover, the thermal testing takes place every five years, that is why the models obtained this way sometimes do not reflect the real state of the unit. The advantage of the method is that the results are always available at any power station, so it is always possible to obtain the data for the model this way. The model obtained may be not very accurate, but it is certainly better than nothing.

The problem of obtaining the energy characteristics models reflecting the real state of the power plant units is very important nowadays, because the problem of load distribution optimization is very important too. Implementing of an optimization sub-system is impossible without the models mentioned, because otherwise the total error of the model can exceed the optimization benefits.

As a rule, it is very difficult or impossible to carry out the active experiment at a working unit. The passive experiment is possible at units which are equipped with modern program-technical complexes having archiving functions. Unfortunately, not all the units are equipped with the modern hardware, so the model obtaining on the basis of the thermal testing results may be necessary.

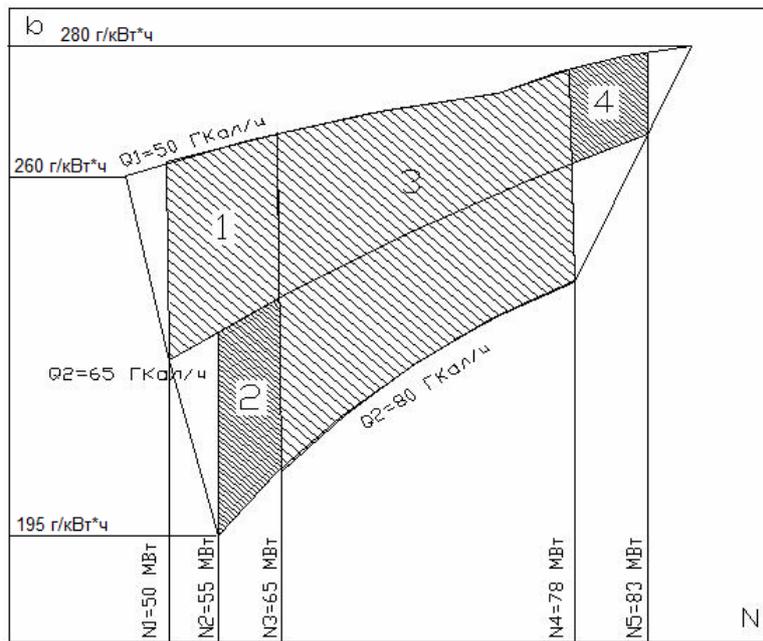
The results of the thermal testing are usually presented as graphical diagrams, so it is necessary to approximate the data in order to obtain the necessary model. In the case of the co-generating unit the approximation is more complicated than for the condensing unit, because the diagrams are more complicated, too. The example of the diagram is given in Fig. 1. In this figure the dependence of the fuel rate on the electric power and heat load of the unit is given.

Let us consider an example.

The input data are taken from a Moscow thermal power station. They are dependences of fuel rate for generated electricity and heat on the electric power and heat load of a co-generating unit for the winter mode of working. The dependence of fuel rate for generated electricity on electric power and heat load is given in Fig 1. It is necessary to obtain the

dependences  $B_e = f(N_e, Q_m)$  (the fuel consumption for generated electricity on electric power and heat load of the unit) and  $B_m = f(N_e, Q_m)$  (the fuel consumption for generated heat on electric power and heat load of the unit) in the form of formula (2), i.e., it is necessary to approximate the graphical dependences.

For approximation of the data and obtaining the model some methods may be used. The least square method is used very often, but in this case it is not very convenient to use it. So, another method is used, so-called the second order planning method [3]. Sometimes the method is also called “Box-Willson method”. Let us consider the approximation according to the method chosen.



**Figure 1:** The dependence of the fuel rate on the electric power and heat load of the unit.

$N_e$  and  $Q_m$  should be presented as non-dimensional values according to formulae (3) and (4) given below:

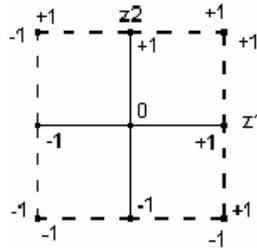
$$z_1 = \frac{N_e - N_{0e}}{\Delta N_e} \quad (3)$$

$$z_2 = \frac{Q_m - Q_{0m}}{\Delta Q_m} \quad (4)$$

So, formula (2) will be transformed into formula (5):

$$B = a_0^* + a_1^* z_1 + a_2^* z_2 + a_{11}^* z_1^2 + a_{22}^* z_2^2 + a_{12}^* z_1 * z_2 \quad (5)$$

In Fig. 2 the plan of the second order experiment is given. The initial matrix of the experiment is given in Table 1.



**Figure 2:** The plan of the second order experiment.

**Table 1:** The initial matrix.

N <sub>0</sub>	Z <sub>0</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub> <sup>2</sup>	Z <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Z <sub>1</sub> *Z <sub>2</sub>
1	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	+	-
3	+	+	-	+	+	-
4	+	-	-	+	+	+
5	+	+α	0	α <sup>2</sup>	0	0
6	+	-α	0	α <sup>2</sup>	0	0
7	+	0	+α	0	α <sup>2</sup>	0
8	+	0	-α	0	α <sup>2</sup>	0
9	+	0	0	0	0	0

α is the value of the so-called star shoulder, it is equal to 1 for a two-factor experiment [3]. Let us orthogonalize the matrix according to formula (6) given below [3]:

$$\tilde{z}_i^2 = z_i^2 - \frac{1}{9} * \sum_{g=1}^9 z_{ig}^2 \quad (6)$$

The orthogonalized matrix is given in Table 2.

**Table 2:** The orthogonalized matrix.

N <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	$\tilde{z}_1^2$	$\tilde{z}_2^2$	z <sub>1</sub> *z <sub>2</sub>
1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	+1
2	+1	-1	+1	+1/3	+1/3	-1
3	+1	+1	-1	+1/3	+1/3	-1
4	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	+1
5	+1	+1	0	+1/3	0	0
6	+1	-1	0	+1/3	0	0
7	+1	0	+1	0	+1/3	0
8	+1	0	-1	0	+1/3	0
9	+1	0	0	0	0	0

Let us compose the plan of the experiment on the basis of the available input data (Fig.1, sector 3). The electric power of the unit is in the range from 65 MW to 78 MW (see Fig.1), the heat load of the unit is in the range from 50 giga-calorie to 80 giga-calorie. Thus,  $\Delta N_s = 6.5 MW$  and  $\Delta Q_m = 15 giga - calorie$ . The values of the input factors and the response function are given in Table 3.

**Table 3:** The factors and the response function in different points of the plan.

№	N, MW	Q, giga-calorie	The input data		According to the regression equation	
			b, g/kW*h	B, t/h	B, t/h	$\delta$ , %
1	78	80	289,5	23,16	23,43	1,17
2	65	80	288	18,72	18,1124	3,25
3	78	50	314,3	25,144	25,8104	2,65
4	65	50	314	20,41	20,1008	1,51
5	78	65	303	24,24	24,6998	1,90
6	65	65	302	19,63	19,1862	2,26
7	71,5	50	314	22,451	22,6355	0,82
8	71,5	80	289	20,664	20,4511	1,03
9	71,5	65	302,5	21,63	21,6229	0,03

Let us find the non-dimensional coefficients of the regression equation according to the following formulae:

$$a_i = \frac{1}{9} * \sum_{g=1}^9 z_{ig} * y_g \quad (6)$$

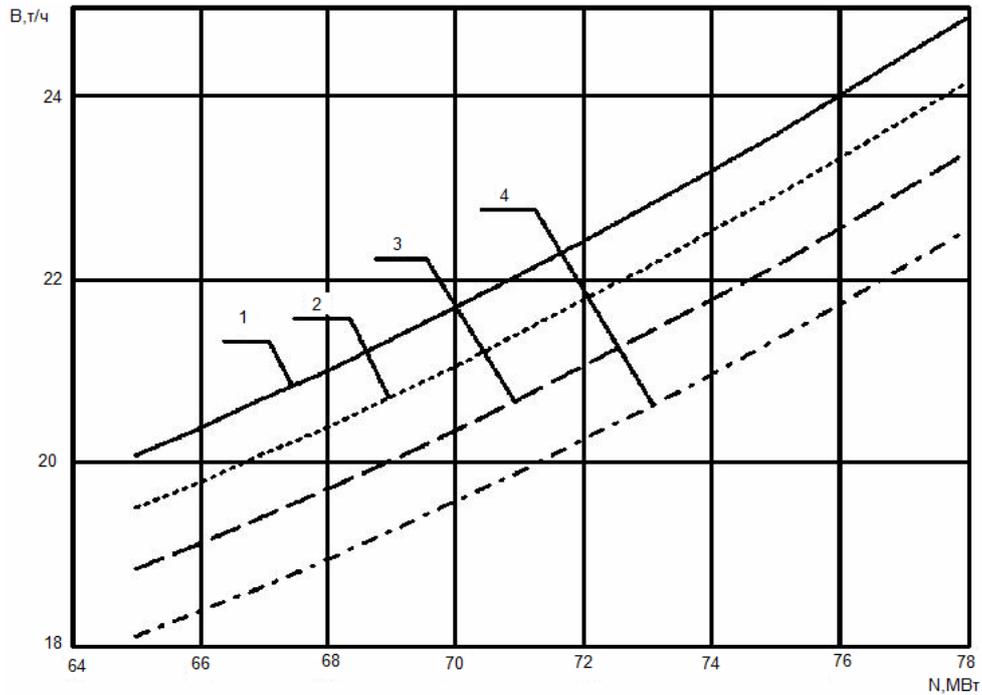
$$a_0^* = a_0 - \sum a_{ii} * \left(\frac{1}{9} * \sum_{g=1}^9 z_{ig}^2\right) = a_0 - \frac{2}{3} * \sum a_{ii} \quad (7)$$

After that the dimensional coefficients can be find. The non-dimensional and dimensional coefficients are given in Table 4.

**Table 4:** Dimensional and non-dimensional coefficients of the energy characteristic of the unit (for generated electricity).

	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_{11}$	$A_{22}$	$A_{12}$
Non-dimensional	21,6229	2,7568	-1,0922	0,3201	-0,0796	-0,098
Dimensional	24,0203	-0,401	0,0363	0,005691	-0,0003537	-0,0008711

From Table 3 we can see, that the error inside the plan is lower than 5% and in most cases lower than 3%, so the model is acceptable. In Fig.3 the energy characteristics (for generated electricity) for the winter mode of working for the unit are given.



**Figure 3:** The energy characteristics (for generated electricity) for the winter mode of working.

1 -  $Q_m = 50 \text{ giga-calorie/h}$ ; 2 -  $Q_m = 60 \text{ giga-calorie/h}$ ;

3 -  $Q_m = 70 \text{ giga-calorie/h}$ ; 4 -  $Q_m = 80 \text{ giga-calorie/h}$ .

The energy characteristic for generated heat can be obtained in the same way.

The model obtained does not have the acceptable error in the whole range of the loads. In order to obtain a model for the whole range, one can divide the diagram (see Fig.1) in several sectors and obtain an independent model for each sector. For example, the diagram, given in Fig.1 is divided into four sectors and we have obtained the model for sector 3. If necessary, one can divide the diagram into more sectors.

The error of the model is less than 5% in the shaded regions. Outside the shaded regions the error is higher.

The models obtained on the basis of thermal testing results do not reflect the real state of the unit in many cases, because the thermal testing takes place every five years. That is why it is better to use the models obtained on the basis of the results of the passive experiment or use the corrections, obtained, for example, on the basis of surveys of the power plant employees.

## References

- [1] *Merzlikina E. Y.*: Optimization of heat and electric load between the power plant units under ambiguity of input data. Abstract of a thesis. – MPEI, Moscow, 2004.
- [2] *Pletniov G. P.*: Automated control systems for thermal power plants. – MPEI, Moscow, 1995.
- [3] Statistical methods in engineering research. Moscow: «The Higher School», 1983. - 216 p.
- [4] *Arakelian E. K., Starshinov V. A.*: The improvement of efficiency and load following capability of thermal power plants equipment. MPEI, Moscow, 1993. - 328 p.

# Messdatengestützte Modellierung und Simulation einer Gasturbine

Bodo Blume, Christof Büskens & Dennis Wassel  
dwassel@math.uni-bremen.de

Universität Bremen, Zentrum für Technomathematik, AG Optimierung und Optimale  
Steuerung  
Zentrum für Technomathematik, Postfach 33 04 40, 28334 Bremen

## Kurzfassung

Moderne Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugen Wärme und elektrische Energie mit hoher Effizienz und reduziertem Ausstoß von Treibhausgasen. Hohe Treibstoffpreise, gesetzliche Vorschriften und Emissionshandel erschweren den kosteneffizienten Betrieb solcher Anlagen. Mathematische Modelle können helfen, einen optimalen Betrieb zu gewährleisten.

Die meisten KWK-Anlagen nutzen Turbinen als ein Hauptelement der Energieerzeugung. Auf physikalischer Basis erstellte Modelle dieser Komponenten sind rechenintensiv und müssen über geeignete Parameter an jede Turbine neu angepasst werden.

In dieser Arbeit wird ein modellfreier Zugang gewählt, der nicht auf physikalischen Grundsätzen sondern auf Messdaten beruht. Schon mit sehr einfachen Ansatzfunktionen kann die elektrische Leistung der Turbine mit einem maximalen Fehler unter 1% modelliert werden. Grundlage dieser Modellierung sind zuverlässige Daten und ein Algorithmus zur schnellen Berechnung des Modells.

## 1 Einleitung

Der Preisanstieg für fossile Brennstoffe, gesetzliche Vorgaben sowie Förderungen für effiziente Energiegewinnungsanlagen geben ein komplexes Umfeld für die Betreiber solcher Anlagen vor, die Anlagen sind zu einem zunehmend schwerer kalkulierbaren Kostenfaktor geworden. Herkömmliche (Groß-)Kraftwerke erzeugen aus thermischer Energie elektrische Energie. Dabei erreichen sie einen (elektrischen) Wirkungsgrad von etwa 30-40%. Auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) erzeugen elektrische Energie, nutzen die dabei abfallende thermische Energie aber weiter, zum Beispiel als Fernwärme, zur Dampferzeugung oder für eine Kälteanlage. Durch die Modellierung, Simulation und Optimierung von KWK-Anlagen sollen diese besser verstanden und betrieben werden. Weiterhin können Modelle helfen, Fehler in den Anlagen frühzeitig zu erkennen. Schon bevor es aufgrund eines Fehlers in der Anlage zu einem Ausfall einzelner Komponenten kommt, sind diese oft bereits frühzeitig durch geringe Änderungen der Leistung erkennbar. Mit hinreichend genauen Modellen können diese Änderungen frühzeitig erkannt und größere Schäden bzw. ein Ausfall der Anlage

vermieden werden. Weiterhin können u.U. die Wartungsintervalle verlängert und damit Kosten eingespart werden.

Wesentlicher Bestandteil zur Energieerzeugung sind Gasturbinen. Um volle Leistung zu erzielen, muss die Turbine in regelmäßigen Abständen für einige Stunden zur Reinigung abgeschaltet werden. Hinzu kommen in längeren Zeitabständen komplette Demontagen zur Wartung der Anlage. Weitere Einflussgrößen für die Leistung einer Turbine sind z.B. die Umgebungstemperatur oder die Luftfeuchtigkeit.

## 2 Modell

Für die Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der elektrischen Leistung einer Turbine wird ein modellfreier Ansatz gewählt. Als Ansatzfunktion wird eine Funktion  $f: \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , die von vorhandenen Eingangsdaten  $x_i \in \mathbb{R}^k, i = 1, \dots, m$  und einem Parametervektor  $p \in \mathbb{R}^n$  abhängt, gewählt. Ist  $f$  linear in  $p$ , so erhalten wir z.B.  $f(x_i; p) = c(x_i)^T p$ , mit einer (im Allgemeinen nichtlinearen) Funktion  $c: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$ . Zur Bestimmung des unbekannt Parametervektors  $p$  wird eine effiziente Ausgleichsrechnung verwendet. Sind Ausgangsdaten  $y \in \mathbb{R}^m$  bekannt und ist  $f$  eine zur Approximation geeignete Funktion, so lässt sich mit  $x = (x_1^T, \dots, x_m^T)^T$  unter Verwendung der Notation  $F(x, p) = (f(x_i, p))_{i=1, \dots, m}$  der gesuchte Vektor  $p$  als Lösung des Problems

$$\min_{p \in \mathbb{R}^n} \|F(x; p) - y\|_2^2 = \min_{p \in \mathbb{R}^n} \sum_{i=1}^m (f(x_i, p) - y_i)^2$$

bestimmen. Da  $f$  linear in  $p$  angenommen wurde, lässt sich das Problem für  $m \gg n$  auf die Lösung eines überbestimmten Gleichungssystems reduzieren. Dafür sei die Matrix  $C = C(x) \in \mathbb{R}^{m \times n}$  definiert, deren Zeilen von  $c(x_i)^T$  gebildet werden. Dann ist  $F(x; p) = C(x)p$  und das Minimierungsproblem kann durch

$$\min_{p \in \mathbb{R}^n} \|Cp - y\|_2^2$$

formuliert werden. Für diese Problemklassen sind effiziente Lösungsstrategien bekannt, von denen eine nachfolgend kurz skizziert sei. Ist durch

$$Q\hat{R} = C, \quad \hat{R} = \begin{pmatrix} R \\ 0 \end{pmatrix}$$

eine QR-Zerlegung von  $C$  gegeben, so lässt sich das Problem aufgrund der Orthogonalität von  $Q$  umformulieren zu

$$\min_{p \in \mathbb{R}^n} \|Cp - y\|_2^2 = \min_{p \in \mathbb{R}^n} \left\| Q \begin{pmatrix} R \\ 0 \end{pmatrix} p - y \right\|_2^2 = \min_{p \in \mathbb{R}^n} \left\| \begin{pmatrix} R \\ 0 \end{pmatrix} p - Q^T y \right\|_2^2.$$

Die Lösung dieses Problems ist mit

$$\|h_2\|_2^2 = \min_{p \in \mathbb{R}^n} \|F(x, p) - y\|_2^2$$

gegeben, wobei

$$h := \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} := Q^T y, \quad h_1 \in \mathbb{R}^n, h_2 \in \mathbb{R}^{m-n}$$

ist und  $p$  durch die Lösung des Gleichungssystems

$$Rp - h_1 = 0 \Leftrightarrow Rp = h_1$$

erhalten wird. Da  $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$  eine obere Dreiecksmatrix ist, lässt sich diese Gleichung effizient lösen.

Für die Modellierung der Leistung der Gasturbinen der KWK-Anlage nutzen wir eine Summe  $P(z)$  von Monomen mit maximalem Grad  $d \leq 5$  in  $k$  Variablen  $z = (x_i), i = 1, \dots, k$ . Mit dem Multiindex  $\alpha \in \mathbb{N}_0^k$  und der Standardnotation

$$|\alpha| = \sum_{i=1}^k \alpha_i, \quad z^\alpha = \prod_{i=1}^k z_i^{\alpha_i}$$

lässt sich die Summe darstellen als

$$P(z) = \sum_{|\alpha| \leq d} p_\alpha z^\alpha.$$

Aus der Kombinatorik stammt die Aussage, dass es

$$n = \sum_{i=0}^d \binom{k+i-1}{i} = \binom{k+d}{d}$$

mögliche verschiedene Multiindizes gibt. Dieser Ansatz führt zu einer leicht differenzierbaren, überall definierten Funktion  $P(z)$ . Aus den Datensätzen  $x_i \in \mathbb{R}^k, i = 1, \dots, m$  und den Multiindizes  $\alpha_i \in \mathbb{N}_0^k, i = 1, \dots, m$  kann die für die Bestimmung des Parametervektors benötigte Matrix

$$C = \begin{pmatrix} x_1^{\alpha_1} & \dots & x_1^{\alpha_n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_m^{\alpha_1} & \dots & x_m^{\alpha_n} \end{pmatrix}$$

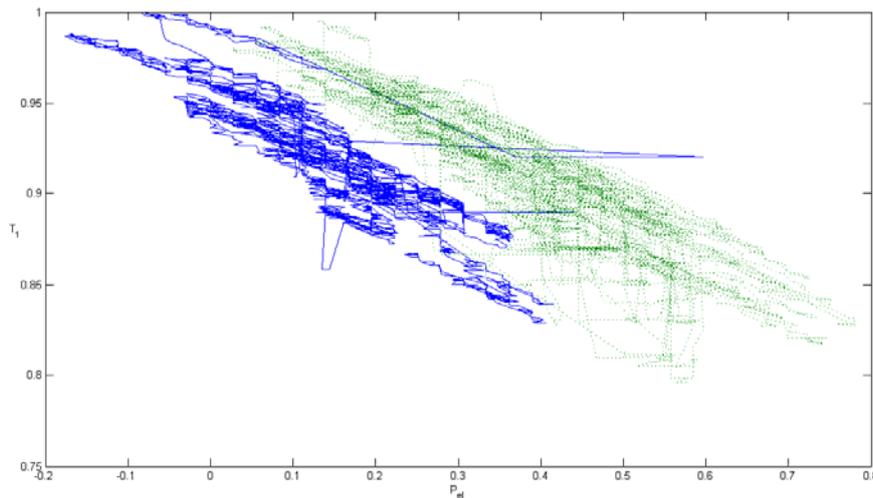
berechnet werden. Bezeichnet  $y \in \mathbb{R}^m$  die zu den  $m$  Datensätzen gehörenden Messwerte auf der Ausgangsseite, so liegt die oben beschriebene Standardform vor.

### 3 Ergebnisse

Zur Modellierung der elektrischen Leistung der Gasturbinen werden als Eingangsdaten die Tageszeit, die Betriebszeit der Gasturbine, die Laufzeit nach der letzten Reinigung, die Außentemperatur, der Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit verwendet. Vorliegende Daten zur Menge und Qualität des genutzten Gases erwiesen sich aufgrund der verwendeten Sensoren als zu ungenau. Daher werden die Temperaturen der zugeführten Verbrennungsluft, die Temperatur in der Brennkammer sowie die Temperatur des Abgases als weitere Eingangsgrößen verwendet. Da die Temperaturen in der Brennkammer und im Abgas direkt auch von der Gasqualität und -menge abhängig sind, können sie als Ersatzgrößen verstanden werden. Gleichzeitig führt dies zu einer Reduktion der Anzahl der Eingangswerte und damit zu einer kleineren Matrix  $C$ . Insbesondere bei höherem Grad der Monome in der Ansatzfunktion führt dies zu kürzeren Rechenzeiten. Da die Anpassung der Temperatur in der Brennkammer bei schnellen Leistungssteigerungen aber relativ träge ist, treten bei starken Änderungen der Leistung Abweichungen von der Realität auf, die entsprechend zu interpretieren sind.

Vor der Modellbildung wurden die Daten einem Test auf Clusterbildung unterzogen. Trägt man die Temperatur der Luft am Turbineneintritt über der gemessenen elektrischen Leistung der Turbine auf, so zeigen sich zwei Cluster (siehe Abbildung 1). Eine genauere

Analyse der Daten zeigt, dass in der Zeit zwischen den beiden Clustern eine Wartung mit Austausch grundlegender Komponenten der Turbine erfolgte. Somit sind die beiden Cluster bei der Erstellung eines Modells aus datentechnischer Sicht getrennt zu behandeln.



**Abbildung 1:** Gegenüberstellung der am Turbineneintritt gemessenen Lufttemperatur (normiert) und der elektrischen Leistung der Turbine. Deutlich erkennbar sind zwei Cluster der Daten.

Mit den genannten Eingangsgrößen werden Modelle mit einem maximalen Grad  $d \leq 5$  pro Monom berechnet. Erwartungsgemäß nimmt der maximale Fehler mit zunehmendem Grad ab und die Zeit zur Berechnung der Matrix  $C$  zu (vgl. Tabelle 1).

Grad	rel. Fehler $\ \cdot\ _2$	rel. Fehler $\ \cdot\ _\infty$	Dimension $C$	Ber. $C$ [sec]
1	1.2%	10.7%	$14865 \times 10$	1.5
2	0.7%	8.1%	$14865 \times 55$	8.0
3	0.4%	2.8%	$14865 \times 220$	32.3
4	0.3%	2.2%	$14865 \times 715$	107.6
5	0.2%	1.6%	$14865 \times 2002$	3315.2

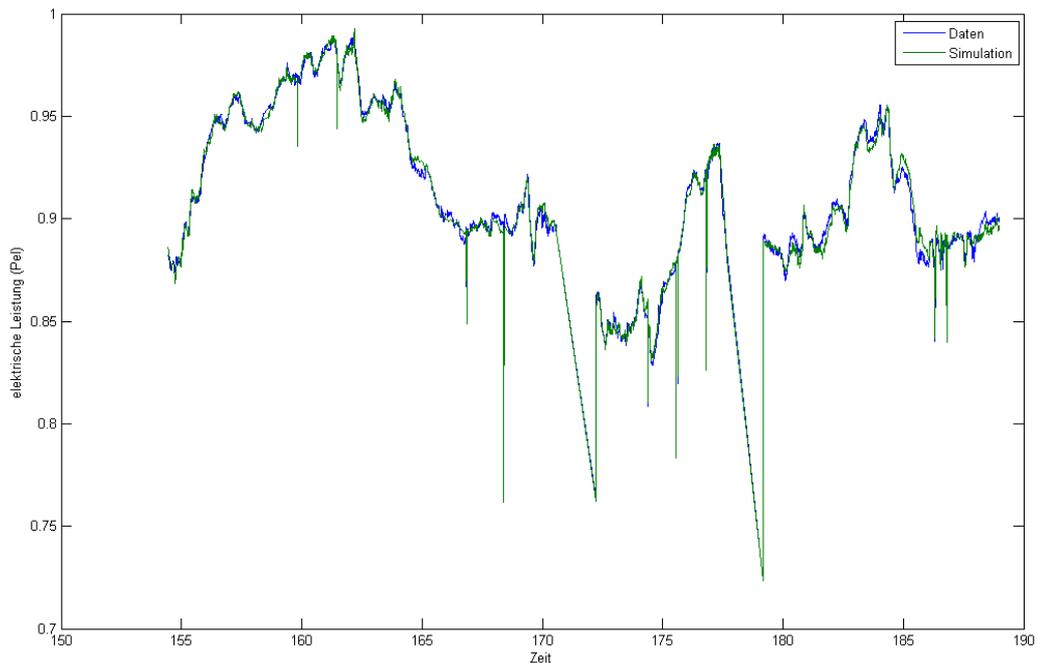
**Tabelle 1:** Ergebnisse des relativen Fehlers und Berechnungszeiten für die Erstellung eines Modells (Daten 1. Cluster) bei unterschiedlichem maximalem Grad der Monome in der Ansatzfunktion.

Die zur Berechnung der Matrix  $C$  und der Bestimmung des Modells benötigte Zeit hängt von der Anzahl an verwendeten Datensätzen und der Anzahl der Eingangsgrößen ab. Es ist daher vorteilhaft, die Anzahl der verwendeten Eingangsgrößen zu reduzieren.

Es ist zu erwarten, dass die Temperatur in der Brennkammer abhängig ist von der Temperatur am Turbineneintritt und ebenso die Abgastemperatur beeinflusst. Nimmt man weiterhin an, dass die Betriebszeit der Gasturbine sowie die Tageszeit nur einen geringen Einfluss auf die elektrische Leistung der Turbine haben, kann die Zahl der Eingangsgrößen auf die fünf Werte Außentemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Laufzeit nach der letzten Reinigung und Temperatur in der Brennkammer reduziert werden. Durch die Reduktion nimmt der Fehler zu, die benötigte Rechenzeit aber deutlich ab (vgl. Tabelle 2).

Grad	rel. Fehler $\ \cdot\ _2$	rel. Fehler $\ \cdot\ _\infty$	Dimension C	Ber. C [sec]
1	1.5%	12.7%	$14865 \times 6$	0.9
2	1.2%	12.5%	$14865 \times 21$	2.8
3	1.1%	12.6%	$14865 \times 56$	7.4
4	1.0%	12.7%	$14865 \times 126$	16.8
5	0.8%	12.4%	$14865 \times 252$	34.0

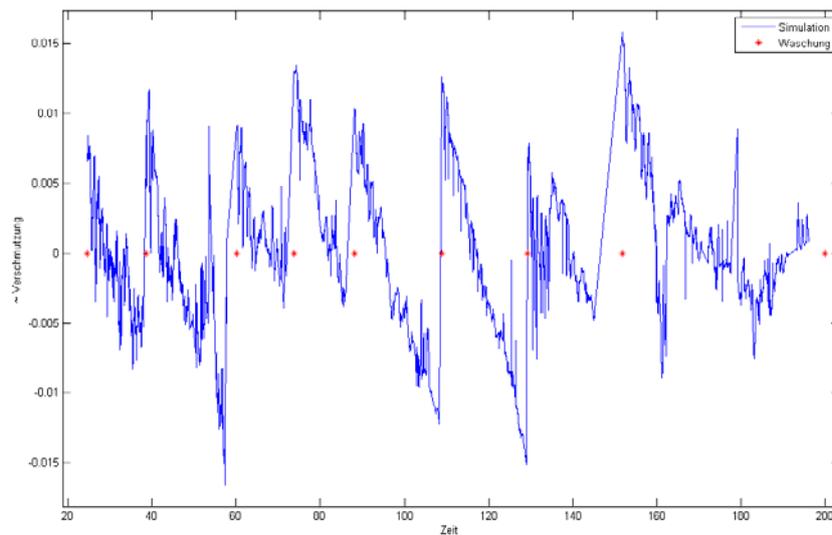
**Tabelle 2:** Ergebnisse des relativen Fehlers und Berechnungszeiten für die Erstellung eines reduzierten Modells (Daten 1. Cluster) bei unterschiedlichem maximalem Grad der Monome in der Ansatzfunktion.



**Abbildung 2:** Messdaten und Simulationen stimmen bereits sehr gut überein, wenn mit maximalem Grad 3 der Monome in der Ansatzfunktion identifiziert wird (Daten 1. Cluster).

Eine Simulationsrechnung für das reduzierte Modell ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wurden die Daten aus dem 1. Cluster verwendet. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen und modellierten Werte der elektrischen Leistung.

Die Berechnungen zeigen weiterhin, dass die Laufzeit nach der letzten Reinigung der Anlage eine besonders wichtige Eingangsgröße des Modells ist. Dieses wird deutlich, wenn man die Differenz der Ergebnisse zweier Modelle mit bzw. ohne diese Eingabegröße berechnet (vgl. Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Differenz der Ergebnisse zweier Modelle mit bzw. ohne die Eingabegröße „Laufzeit nach der letzten Reinigung (Washing)“.

## 4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein mathematischer Lösungsweg vorgestellt, mit einem statischen Ansatz ein Modell eines technischen Systems zu generieren. Am Beispiel eines umfangreichen Datensatzes einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) konnte gezeigt werden, dass bereits mit sehr einfachen statischen Modellen sehr gute Vorhersagen für die Leistung der Anlage erzielt werden können. Es wurden Modelle unterschiedlicher Komplexität verglichen und die Fehler und Rechenzeiten analysiert. Der vorgestellte Lösungsansatz belegt in eindrucksvoller Weise die weitreichenden Möglichkeiten moderner mathematischer Verfahren in der Optimierung von energie- und umweltrelevanten Prozessen.

# Using System Dynamic Modeling to Study the Iranian Power Plants Maintenance Strategies

S. Mohammad Asadzadeh and Hamed Shakouri  
smasadzadeh@ut.ac.ir; h.shakouri@gmail.com  
Department of Industrial Engineering, Collage of Engineering,  
University of Tehran, P.O. Box 11365-4563, Iran

## Abstract

The existing reactive maintenance culture in Iranian power plants causes power plants to work at low generation capacity and consequently low productivity in electricity generation. Considering the maintenance strategies combination in a sample power plant, the main purpose of this paper is to develop a SD model to study different combination of different maintenance strategies in power plants. This model primarily can be used to show managers the impact of different strategies on two key plant operation performance indicators, i.e. maintenance cost and available capacity (plant uptime). The results of this study will examine the superiority of more advanced and proactive maintenance strategies over existing reactive strategies in power plants.

*Keywords:* Maintenance Strategy; System Dynamics; Power Plants

## 1 Problem definition

Maintenance costs in power plants often are viewed as only an expense and this entrenched mental model usually leads to increasing total maintenance costs and lower plant uptime. It is true because such a view causes the plant managers to use a reactive maintenance strategy rather than preventive, predictive, and proactive strategy.

Some barriers as follows, make it difficult to spread the proactive maintenance strategies in Iranian power plants maintenance systems.

- The role and importance of proactive maintenance are not well known to the managers
- Managers don't have proper commitment to implementing proactive maintenance strategies
- The maintenance work force often are busy on reactive maintenance work

Beside the above problematic view in maintenance management of Iranian power plants, tooling, work scheduling and planning, training, incentive and punishment system, and feedback system are also areas of poor performance of power plants maintenance management.

There are four maintenance strategies, which are commonly used in industrial plants as follows:

- Reactive maintenance: Corrective actions are taken when a failure occurs. Unplanned shutdowns, lost production and expensive repair are common in this strategy.
- Preventive maintenance: Periodic works (e.g. overhaul, lubrication, or part replacement) are performed based on regulatory standards or manuals. Unnecessary maintenance work and lost production due to frequent shutdowns may result in higher maintenance cost.
- Predictive maintenance: maintenance work is performed based on the equipment condition. Condition monitoring systems to assess and predict the equipment condition play a vital role in this strategy. Some examples include thermography, ultrasonic, vibration monitoring, and oil analysis.
- Proactive maintenance: In this strategy the focus is on eliminating the root cause of the maintenance requirement. Improvement in design, operation, and maintenance practices are the actions taken after root cause failure analysis.

Each strategy has various options of processed period, duration, costs, impact on the maintained item, etc. This makes it a difficult task to find an efficient maintenance strategy for a system. System Dynamics (SD) is a method which has established to analyze and model complex dynamic systems. The developed SD models in maintenance optimization do not only enable the user to compare the efficiency of different maintenance activities with each other, but also provide the possibility to determine a combination of these activities leading to an overall system maintenance strategy at a cost minimum through optimization. This allows managers to evaluate their current maintenance program and to determine an economically improved strategy for the future. Maintenance system in power plants has many aspects of a complex system, as it includes many interactions between variables in plant operation. As a result SD modeling is an ideal tool for analysis of such a system. The main purpose of this paper is to develop a SD model to study different combination of different maintenance strategies in power plants. This model primarily can be used to show managers the impact of different strategies on two key plant operation performance indicators, i.e. maintenance cost and plant uptime.

## **2 Brief Literature Review**

A system dynamics model was developed using the defects management process first invented by Ledet and team in 1991 (Serman, 2000) and later converted to The Manufacturing Game (Ledet and Mark, 1994) for maintenance management simulation. Böhm et al. (2009) proposed a system dynamic model to find a maintenance strategy which fulfils the high standards for availability and safety in the railway sector. Linard (2000) discusses a system dynamics based pavement management model developed at the Australian Defense Force Academy and discusses briefly the extension of this model to incorporate political feedback and also system optimization using genetic algorithm techniques. In Crisp and Birtwhistle (2004), a system dynamics model is presented to

examine the effect of various maintenance and replacement scenarios on equipment failure rate, asset population, age and condition, for assets with characteristics typical of electricity transmission equipment. Studies done by Moore (2007) in the United States, and De Jong (1997) in Australia concluded that optimal industrial plant operation requires reactive and preventive maintenance to be reduced, while predictive and proactive maintenance should be increased.

### **3 The proposed methodology**

The proposed methodology of this study can be represented in four stages. First, a survey on the state of maintenance work in Iranian power plants is done. Through this survey the overall maintenance cost in power plants, the number of maintenance employee are determined. Also a benchmarking study over this overall data is done to compare the maintenance performance with those in developed countries such as US. In second stage, a SD model is developed to study the impact of different maintenance strategies in power plants. The main structure of this model is presented in next section. Unfortunately in Iranian power plants, there is no an appropriate system for gathering and reporting the maintenance data in detail. Also the state of different strategies in a power plant should be determined and again the published data by power plants does not contain such a data. So, in stage three of the methodology there will be a survey through interview and questionnaire by managers and engineers in one of the Iranian power plants for gathering data needed to run the model. Scenario definition on different strategies and assessing the results of implementing each scenario using the SD model developed is the final stage of the methodology.

### **4 The main structure of the model**

The SD model proposed by Ledet and team in 1991 in Sterman (2000) is a basis to develop an appropriate SD model to assess the maintenance system in a power plant. We also exploit the work by Chumai (2007) to form some loops in SD model, especially predictive maintenance modelling in SD model. The SD model of this study is depicted in Figure 1.

### **5 Probable Results**

The existing reactive maintenance culture in Iranian power plants causes power plants to work at low generation capacity and consequently low productivity in electricity generation. The results of this study will examine the superiority of more advanced and proactive maintenance strategies over existing reactive strategies in power plants. The state of maintenance work, maintenance strategies combination and its costs in a sample power plant will be determined. The influence of each strategies combination on plant uptime and available capacity over time will be assessed.

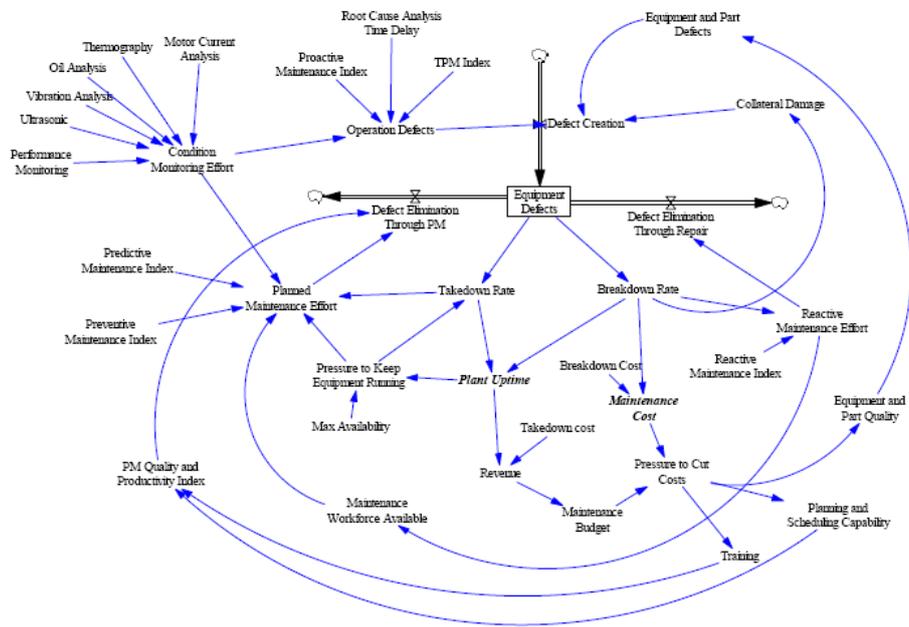


Figure 1: The SD model of study

## 6 References

- [1] T. Böhm, K. Beck, A. Knaak & B. Jäger Efficient maintenance strategy through System Dynamics, DOI: 10.2495/CR080731. (Available from: <http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=19579>)
- [2] K. T Linard, Application of System Dynamics to Pavement maintenance Optimization. First International Conference on Systems Thinking in Management, 2000, pp 347-352
- [3] Jj Crisp and D. Birtwhistle, System Dynamics Modelling: Application to Electricity Transmission Network Asset Management. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004) 26-29 September 2004, Brisbane, Australia
- [4] Ledet, Winston and Paich, M. (1994). The Manufacturing Game, Goal/QPC TQM Conference, Boston, US.
- [5] De Jong, E. (1997). Maintenance Practices in Small and Medium Sized Manufacturing Enterprises, The National Center for Advanced Materials Technology, Monash University, Melbourne, Victoria, Australia.
- [6] Moore, R. (2007). Selecting The Right Manufacturing Improvement Tools: What Tool? When?, Elsevier Butterworth-Heinemann.

- [7] Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*: McGraw-Hill.
- [8] Roengchai, C. System Dynamic Modeling of Plant Maintenance Strategy in Thailand, The 2007 International Conference of the System Dynamics Society and 50th Anniversary Celebration July 29 – August 2, 2007, Boston, Massachusetts.

# Analysis of China's Energy Challenges and Problems

ShoukeWei<sup>1</sup> and Shafi Noor Islam<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Email: shouke.wei@eawag.ch, Department System Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Ueberlandstrasse 133, 8600 Duebendorf, Switzerland.

<sup>2</sup> Email: shafinoor@yahoo.com Department of Ecosystem and Environmental Informatics, Brandenburg University of Technology (BTU), Cottbus. Konrad-Wachsmann-Allee 1, D – 03046 Cottbus

## Abstract

Energy is vital to the survival and development of human being on the earth. The increasing energy and its related environmental problems have become focusing issues in the world. China takes the first place in energy production and the second in consumption in the world. It is playing and will continue to play an important role in energy production and consumption, energy structure as well as environmental and ecological protection in the world. This study investigated China's energy situation, challenges and problems through an analysis based on environmental and resource economic fundamentals, and statistic regression methods. According to China's real situation, those challenges and problems, five important strategies were proposed to amend current energy challenges and problems. Those study results will benefit energy scholars, planners, strategists and organizations to further study China's energy problems and to make energy policy.

*Keywords:* Energy, challenge, problem, analysis, strategy, policy, China

## 1 Introduction

Energy is one of the essential factors for socio-economic development and life-style of a nation. However, in the past decades, increasing energy consumption and its related environmental problems have become focusing issues in the world. According to BP Statistical Review of World Energy [1], in 2007 world primary energy consumption increased by 2.4%, and global oil consumption 1.1%, gas consumption 3.1%, and coal consumption 4.5%. With increase of energy consumption, severe environmental and ecological problem also arose. The Intergovernmental Panel on Climate Change [9] illustrated that annual CO<sub>2</sub> emissions have increased between 1970 and 2004 by about 80%, from 21 to 38 gigatonnes (Gt), and took 77% of total anthropogenic GHG emissions in 2004. The global warming trend over the 50 years from 1956 to 2005 is nearly twice that for the 100 years from 1906 to 2005.

China takes the first place in energy production and the second in consumption in the world. However, China is facing serious problems and challenges in energy fields due to its shortage of energy reserves per capita, limited environmental capacity, the fragile ecology of west, inefficient energy consumption structure, large population as well as unsta-

ble international market. In this study, the authors investigated energy status, challenges and problems in China through an analysis based on statistic, and environmental and resource economic fundamentals. The following section it starts with presenting the methods and data sources. Then it states China's energy status in the world. Then it turns on to explore the challenges and problems related to China energy production, supply and consumption in section 4. In the section 5, strategies for sustainable energy development are proposed. Last section concludes the paper.

## **2 Methods and materials**

Environmental and resource economic fundamental, tables, diagrams, and statistic and econometric regression analysis methods were used for the problems analysis, and comparison between China and other countries. The main data include energy data, economic data, air temperature data and CO<sub>2</sub> emission data, and main data sources are Statistical Review of World Energy [1], the online database of Carbon Dioxide Information Analysis Center [2], China Statistical Yearbook [11], International Statistical Yearbook [12], Chinese energy statistical yearbook (1997-2007), online data of Earth Policy Institute Resources on TEMPERATURE and CLIMATE [4], Earth System Research Laboratory [5], International Energy Outlook Energy Information Administration [6], Intergovernmental Panel on Climate Change [9], Goddard Institute for Space Studies [8], etc.

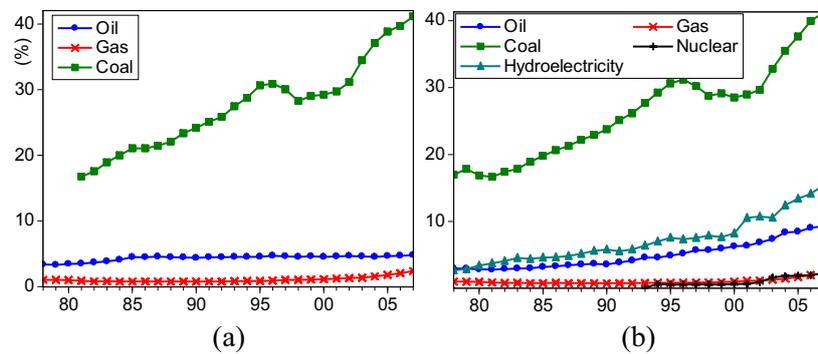
## **3 International status of China energy**

China has become the largest country in energy production since 2005 and the second largest in energy consumption in the World. At the end of 2007, it was estimated that China had proved oil reserves of 2.1 thousand million tos (tonnes), natural gas reserves of 1.88 trillion m<sup>3</sup>, coal of 114500 million toe (tonnes oil equivalent); and they shared 1.3%, 1.1% and 13.5% of world total in those three energy types, respectively. In 2008, China shared 4.8% of world oil, 2.4% of world natural gas and 41.1% of the world coal in production [1] (Fig. 1a).

In the world consumption, China energy consumption grew very first. China oil took 9.3%, natural gas 2.3%, coal 41.2% and hydroelectricity 15.4% (Fig. 1b). China nuclear energy consumption shared 0.08% of the world in 1993, but it has taken 2.3% of the total world in 2007. World primary energy consumption was increased by 2.4% in 2007, which was less than growth rate of 2.7% in 2006. However, China energy consumption growth was 7.7% in 2007, although it was the weakest since 2002, and it accounted for half of global energy consumption growth [1].

## **4 Energy challenges and problems in China**

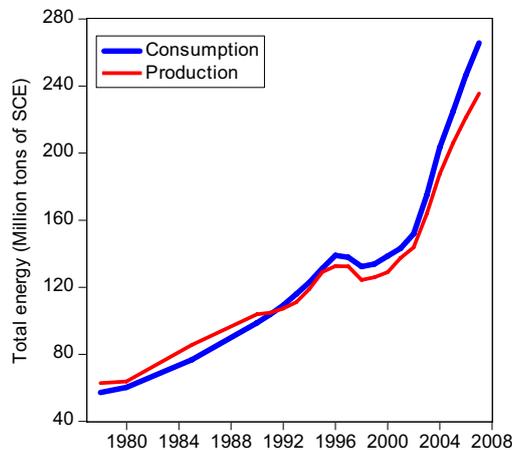
China is facing a lot of energy challenges and problems, such as extreme shortage of energy, poor structure of energy production and consumption, inefficient energy consumption, low energy technology, tremendous energy supply to meet demand of rural area, severe energy-related pollution, and so on.



**Figure 1:** Proportion of China energy in the world (a) Production, (b) Consumption.

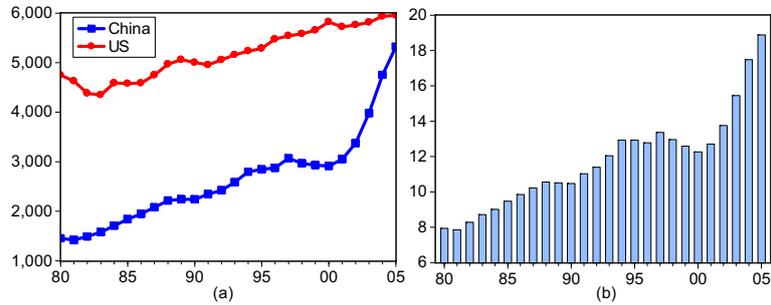
#### 4.1 Three big challenges

*Extreme shortage of energy:* In China, energy supply and demand has already gone above the present estimated energy production (Fig.2). In the past two decades, Reserve-to-Production (R/P) ratios of oil and natural gas in the world were around 40 and 60 [10]. Comparing with the world average, China R/P ratios of oil was only 11.1 in 2006. The shortage of China liquid fuels is much more serious, and the oil importing dependence was about 57.7% in 2007. According to China Energy Statistics [3], China energy supply per capita was 1.32 toe in 2005, which was lower than 1.78 toe of world and far lesser than 7.89 toe of United States. With continuous population increase and economic growth, huge energy demand will give greater pressure on energy supply.



**Figure 2:** Comparison of total energy supply and total energy consumption in China since 1978 (Data source: CSSB 2008).

*Severe pollution:* Consumption of large amount of fossil energy emits great amount of GHG, which degraded the environmental and ecological system. In 2005, China CO<sub>2</sub> emission from the consumption and flaring of fossil fuels reached 5322.69 million metric tons, sharing 18.9% of the world. (Fig. 3)

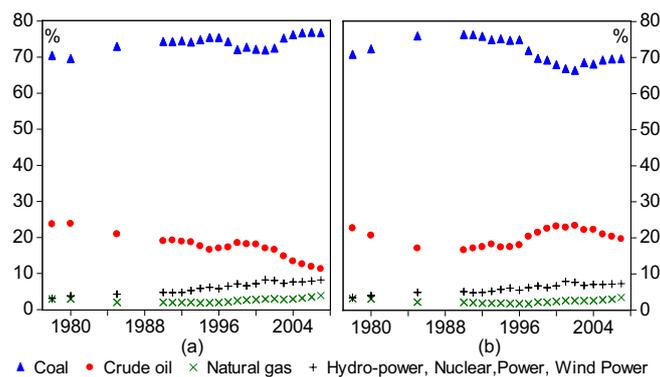


**Figure 3:** (a) Carbon Dioxide Emissions (Million Metric tons) from the consumption and flaring of fossil fuels in China and US (1980-2005), (b) Proportion China’s Carbon Dioxide Emissions (%) in the world emission (Data source: [6], [7]).

*Great amount of rural energy demand:* The huge demand of energy in rural area China is also a very big challenge. The statistic date [6] showed that China had rural population of 727.5 million, sharing 55.06% of the total population in 2007. More than 10 million rural residents do not have electricity [13]. A lot of rural residents are still relying on firewood, stalks and grass. It is real difficult task to supply energy to 700 million rural residents.

#### 4.2 Main problems

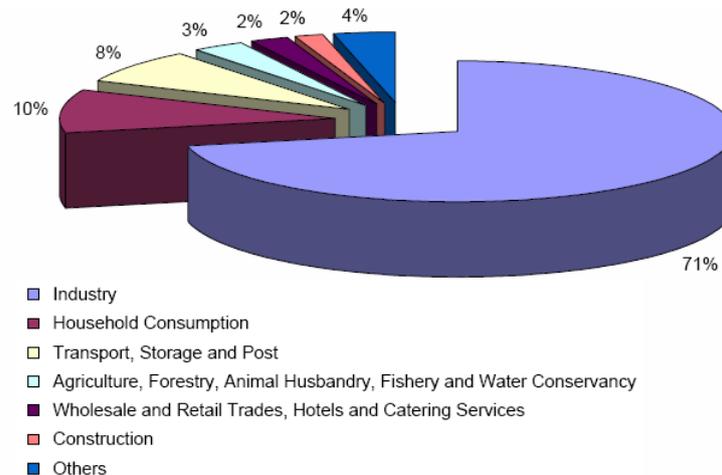
*Unreasonable energy structure:* In energy composition, coal is the main energy, sharing more than 70% of the total annual average from 1978 to 2007. The coal proportion in energy consumption is only around 21% in developed countries (Fig.4). In the energy consumption structure of different socio-economic sectors, industrial energy consumption took a proportion of 71% of the total consumption in 2007 (Fig. 5). A large portion of industries, especially manufacturing, produces low value with high energy consumption.



**Figure 4:** China energy composition structure (a) supply, (b) consumption.

*Inefficient energy consumption:* Energy consumption in China is not efficient. Energy consumption per GDP in China was 8.33 toe per 10 000 US\$ in 2004, while the world average was 2.65 toe per 10 000 US\$, and United States 1.99 toe per 10 000 US\$ (Table 1).

*Other problems:* Some other problems can be categorized as: economic development central policy, impact energy market system, low energy technology and productivity, low awareness on energy saving, ect. ([14]; [10]).



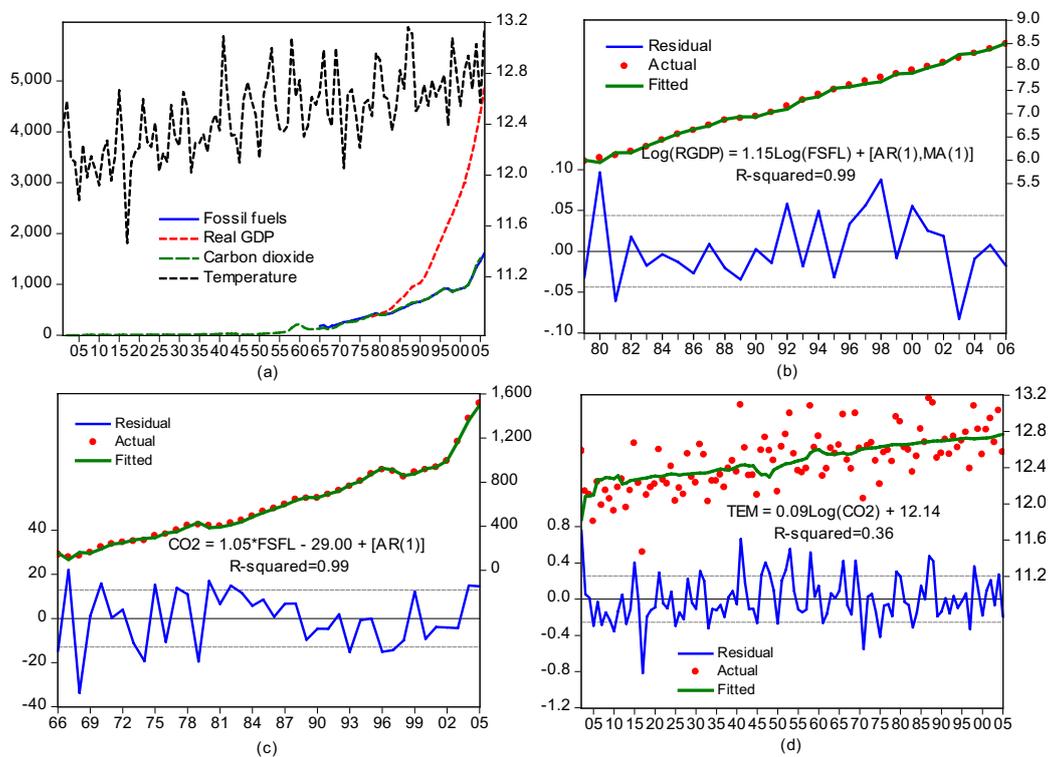
**Figure 5:** China energy consumption structure among different socio-economic sectors.

**Table 1:** Comparison energy consumption per GDP of China with some other selected developed countries (in ton of oil equivalent per 10 000 US\$).

Country or Area	1990	2000	2001	2002	2003	2004
<b>China</b>	<b>24.43</b>	<b>9.37</b>	<b>8.46</b>	<b>8.34</b>	<b>8.42</b>	<b>8.33</b>
Australia	2.74	2.76	2.85	2.63	2.08	1.77
Canada	3.65	3.50	3.49	3.45	3.07	2.75
France	1.83	1.94	1.99	1.83	1.51	1.34
Germany	2.09	1.81	1.87	1.71	1.42	1.27
Japan	1.48	1.14	1.27	1.34	1.22	1.16
New Zealand	3.13	3.29	3.32	2.93	2.14	1.79
United Kingdom	2.14	1.61	1.63	1.45	1.29	1.10
United States	3.35	2.36	2.24	2.20	2.09	1.99
<b>World</b>	<b>3.95</b>	<b>3.12</b>	<b>3.16</b>	<b>3.10</b>	<b>2.85</b>	<b>2.65</b>

### 4.3 Energy, economy, CO<sub>2</sub> emission and global warming

Increasing of energy consumption, especially fossil fuels, has great promoted the economic growth of China. However, the growth of fossil fuel consumption has emitted great amount of GHG, mainly Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), which has become the main cause of global warming. The figure 6(a) illustrates the increasing trend of those factors since 1900s. The other three figures display the regression model results at the significant level ( $P < 0.001$ ). The model equations reveal that, in average, the increase of fossil fuel consumption by 1% causes growth of Real GDP by 1.15% (Fig. 6b), CO<sub>2</sub> emission will increase 1.05 unit if fossil fuel consumption increases by 1 unit (Fig.6c), and temperature will increase about 0.001°C when CO<sub>2</sub> emission grows 1% (Fig.6d), respectively.



**Figure 6:** (a) The trend of fossil fuel consumption (Million toe), real GDP growth (Billion yuan), CO<sub>2</sub> emission (Million metric tons of carbon) and temperature (°C), and Correlations between (b) Real GDP (RGDP) and fossil fuel consumption (FSFL), (c) CO<sub>2</sub> emission and fossil fuel consumption, (d) Temperature and CO<sub>2</sub> emission.

## 5 Energy strategies for amendment

Five important strategies are proposed, which can be expressed as reasonable structure, high efficiency, diversified development and less pollution, functioning market and friendly international cooperation.

*Adjusting the current energy structure:* Unreasonable energy supply and consumption structure is one of the main subjective reasons that cause the insufficient energy consumption and pollution. Therefore, it is very vital to adjust the current energy structure in China. Firstly, China should invest more to hydro-power, nuclear power and wind power, and develop new energy. Secondly, it should limit industrial energy consumption by increasing industrial energy price, taxing the energy wasting industries, and subsidizing the energy efficient users.

*Improving the energy consumption efficiency:* China should not copy the traditional energy-wasting development styles of developed countries in the past. It should 1) consider the energy saving as the first important strategy, 2) propagandize new energy-saving knowledge and technology, 3) raise the energy saving awareness among the society, 3) strengthen energy saving in the sectors of industry, transportation and architecture, and in the developed regions, 4) change the traditional achievement evaluation standard - economic growth rate, 5) perfect the energy laws and increase their punishment forces.

*Developing diversified energy:* To change the coal dominated energy production and consumption structure, China should develop diversified energy, such as hydro-power, nuclear power, wind power and solar power, and other new energy, and increase investment to develop other new environment friendly energy and related technology.

*Improving energy market system:* A reasonable energy market system should include two important aspects: a powerful regulating system and practical price system. A powerful regulating system should have strict law and regulations and firmly controlling organizations. A practical energy price system means that energy price should reflect energy scarcity, situation of energy supply and demand, cost to environmental and ecological protection, and the cost and benefits of different users and stakeholders.

*Amplifying international cooperation:* International cooperation is another vital strategy for China to solve energy supply shortage, and environmental and ecological degradation problems. China should enhance international cooperation from the following main points: 1) to increase energy related technology exchange, 2) to enlarge international investment to energy development, 3) to actively communicate with other countries on international energy market in order to get friendly international environment and stable energy prices, 4) to obtain more international investment and advanced technology for energy saving and pollution mitigation.

## **6 Conclusions**

With its economic development, China becomes world focus. In the energy aspects, China is also playing a very important role in world. From macro and micro point of view, this study investigated energy supply and consumption, the challenges, problems in China using statistic analysis and environmental economic principles. The paper illustrated three big energy challenges in China: insufficient energy supply to meet great amount energy demand, severe energy related pollution and rural energy shortage. It also explored China's main problems in energy structure, energy consumption efficiency, energy policy, energy market, technology and energy saving awareness. Three regression models further revealed the correlations of energy consumption, economic growth and environmental problems in China. Based on those challenges and problems, the study proposed five

important strategies from aspects of reasonable structure, high efficiency, diversified development, less pollution, functioning market, as well as friendly international cooperation.

## 7 References

- [1] *British Petroleum (BP)*. Statistical Review of World Energy June 2008. London: BP, 2008.
- [2] *Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)*. Global Fossil Fuel Carbon Emissions. CDIAC Web. <http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/glo.htm>. Accessed 19 October, 2008.
- [3] *Department of Industrial and Transport Statistics of State Statistics Bureau (DITSSSB) and the Energy Bureau of National Development and Reform Commission (EBNDRC)*. Chinese energy statistical yearbook(1997-2007). Beijing: China Statistics Press, 1997-2007.
- [4] *Earth Policy Institute Resources on TEMPERATURE and CLIMATE (EPIRTC)*. Global Temperature Indicator. EPIRTC web. [http://www.earthpolicy.org/Indicators/Temp/2008\\_data.htm#temptable](http://www.earthpolicy.org/Indicators/Temp/2008_data.htm#temptable). Accessed 18 October, 2008.
- [5] *Earth System Research Laboratory (ESRL)*. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide - Mauna Loa. ESRL Web. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html> Accessible 18.10.2008 Accessed 20 October, 2008.
- [6] *Energy Information Administration (EIA) International Energy Outlook 2008*. Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy Washington, DC 20585, 2008.
- [7] *Energy Information Administration (EIA) World Crude Oil Prices*. EIA Web. [http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet\\_pri\\_top.asp](http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet_pri_top.asp) (Release Date: 10/16/2008). Accessed 17 October 2008.
- [8] *Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA Goddard Space Flight Center: Earth Sciences Directorate*, "Global Temperature Anomalies in .01 C," at [data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata/GLB.Ts.txt](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata/GLB.Ts.txt), updated January 2008.
- [9] *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2007: Synthesis Report*. IPCC, 2007. See: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)
- [10] *Jiang Z M*: Reflection on energy issues in China. Journal of Shanghai Jiaotong University, 42(2008), 345-359.
- [11] *National Bureau of Statistics of China (NBSC): China Statistical Yearbook 2008*. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [12] *National Bureau of Statistics of China (NBSC): International Statistical Yearbook 2008*. Beijing: China Statistics Press, 2008.

- [13] *National Development and Reform Commission (NDRC): The Eleventh Five Year Energy Plan*. Beijing: NDRC, 2007.
- [14] *Ni WD: China's energy-challenges and strategies*. *Front. Energy Power Eng., China*, 1(1) (2007), 1-8.

# Using Energy of Pressure Reduction Stations in Optimizing Natural Gas Supply System

Neda Sadeghi and Hamed Shakouri  
nssadeghi@ut.ac.ir; hshakouri@ut.ac.ir  
Department of Industrial Engineering  
Research Institute of Energy Management and Planning  
College of Engineering, University of Tehran, P.O. Box 11365-4563, Iran

## Abstract

This paper is aimed to introduce a model for natural gas supply systems. Therefore, we have considered whole aspects related to gas industry including production, distribution, transmission and storage in mathematical programming models. Energy resulting from pressure differences between the network transmission and distribution of gas is used to produce LNG as an alternative to storage gas. This study is of great importance for countries like Iran which hold huge gas reserves and long distance pipe lines. Results from testing numerical example show encouraging results from the developed model.

*Keywords:* natural gas, supply system, optimization, mathematical programming

## 1 Introduction

Natural gas currently is regarded as an economical and suitable alternative for oil and coal. International Energy Agency in its detailed assessment has pointed that energy consumption would dramatically shift toward gas from other energy careers. Natural gas as one of the most important energy sources in the world has a lot of complexity in the supply system. Large amounts are spent on extraction, exploration, production, transmission, storage and distribution of natural gas in various stages. Therefore providing a suitable supply system, considering all aspects related to gas industry and components of the transfer and distribution can be very useful in minimizing these costs.

Considering the seasonal changes of natural gas consumption, optimized management of supply system is of great importance to prevent building extra capacities and to meet the additional demand in cold seasons. The result of applying this management is to reduce the investment costs of natural gas supply system in the long term.

Chedid's econometrics model is an important study on natural gas supply systems. He has defined the production amount as a variable dependant on price, GDP, population and correlations between local and global consumption [2]. Krichene studied global supply and demand model of natural gas and also has pinte out low price elasticity, high income elasticity of demand and low price elasticity of supply [7]. Uwe Remme has proposed a mathematical model for Europe's supply system, considering the impact of rising demand

in coming years, he has studied section of supply sources according to lowest cost until 2030 [8].

To design a gas network, optimizing capital investment is necessary. Yingjun Ruan has designed comprehensive and optimized mathematical model of gas network which includes all influencing factors on total capital investment [9]. Hamedi in mathematical model of natural gas supply systems has used hierarchical algorithm in which the outputs of each section has been regarded as the input of next section [6]. Gabriel considering the changes of gas market has proposed a comprehensive model including producers, storage and peak gas operators, third party marketers and four end-use sectors [1]. Franziska Holz has offered supply model of Europe gas (GASMOD), which is structured as a two stage-game of successive natural gas exports to Europe (upstream market) and wholesale trade within Europe and which explicitly includes infrastructure capacities [3]. Guldman has provided a gas supply model for domestic consumption in a region and objective function are defined to minimize the costs of gas distribution contracts including price and non-price parameters [5]. In Zemitis's mathematical model which is called active lines, the compressor capacity has been considered as a restriction [10].

In this paper, impacts of some acts for gas storage, in order to eliminate seasonal demand of natural gas are examined. For this purpose, energy resulting from pressure differences between the network transmission and distribution of gas is used.

Gas from the Gas Field after production (Intake, Acid gas treating ..... ) is sent to high pressure transmission lines (Psig1200-600). After the transfer of high pressure gas, assuming, that the gas with (Psi900) is reached the desired city, its pressure is reduced to about Psi 250 pressure reduction stations and enters the main round of urban ring. Small LNG units are based on gas distribution stations (GDS). This unit is used to use energy derived from the station pressure loss and gain the highest liquefaction coefficient and to spend the least building cost, depending on the type of gas distribution stations, pressure and intensity of the input gas flow from different ways of stations that are appropriate to produce LNG. Extent gas transmission lines and gas distribution centers in some countries such as Iran cause technical and economical possibility of this plan became importance and that is the main goal of this study.

## 2 Methodology

Mathematical programming model is used for designing the existing systems, with the aspects related to gas industry including gas fields as supplier, producer and distributor, injection to gas wells, the consumer (household, commercial, industry, transport ), storage (including liquefaction, maintenance, regasification), import and export as a Supplier and consumer.

The objective function contains different cost components. Including minimise costs of extraction from oil and gas wells and transmission to refineries, gas import and transmission to distributors, natural gas processing and transmission to distributors, natural gas production and transmission to injection wells, distribution and transmission to consumer and exporter, gas transmission from one distributor to another one, gas transmission to the warehouses and gas-holding in storage tanks.

Also, there are five groups of constraints including capacity, input and output balancing, demand satisfaction, alternative of liquefaction technique, and relative constraints to the required binary variables.

### 3 Conclusion

In this paper, we proposed a new nonlinear model for the natural gas supply system. We wrote model by possibility of storage gas in order to use energy resulting from pressure reduction station. We solved proposed model for a numerical example by Lingo software.

### 4 References

- [1] *Gabriel, A., S. Zhuang, J.; Kiet, S.*; “A large-scale linear complementarily model of the North American natural gas market”, *Energy Economics* 27, 639–665, 2005.
- [2] *Chedid, R.; Kobrosly, M.; Ghajar, R.*; “A supply model for crude oil and natural gas in the Middle East”, *Energy Policy* 35, 2096–2109, 2007.
- [3] *Franziska Holz, F.; von Hirschhausen, C. H.; Kemfert, C.*; “A strategic model of European gas supply (GASMOD)”, *Energy Economics* 30, 766–788, 2008.
- [4] *Furey, B. P.*; “A sequential quadratic programming based algorithm for optimization of gas network”, *Automatic* 29, 1439–1450, 1993.
- [5] *Guldmann, J. M.; Wang, F.*; “Theory and Methodology Optimizing the natural gas supply mix of local distribution utilities”, *European Journal of Operational Research* 112, 598–612, 1999.
- [6] *Hamedi, M.; Zanjirani Farahani, R.; Moattar Husseini, M.; Esmaeilian, G. H. R.*; “A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study”, *Energy Policy* 37, 799–812, 2009.
- [7] *Krichene, N.*; “World crude oil and natural gas: a demand and supply model”, *Energy Economics* 24, 557–576, 2002.
- [8] *Remme, U.; Blesl, M.; Fahl, U.*; “Future European gas supply in the resource triangle of the Former Soviet Union, the Middle East and Northern Africa”, *Energy Policy* 36, 1622–1641, 2008.
- [9] *Yingjun Ruan, Y.; Liu, Q.; Zhou, W.; Batty, B.; Gao, W.; Ren, J.; Watanabe, T.*; “A procedure to design the mainline system in natural gas networks”, *Applied Mathematical Modelling* 33, 3040–3051, 2009.
- [10] *Zemitis, A.; Dembovskis, A.; Kondratjevs, K.*; “Mathematical models for the gas supply optimization”, 5th Latvian Mathematical Conference, 2004.

# **Analysing of the Pricing Impact on Natural Gas Consumption in Residential Sector**

Neda Sadeghi and Hamed Shakouri  
nssadeghi@ut.ac.ir, hshakouri@ut.ac.ir  
Department of Industrial Engineering  
Research Institute of Energy Management and Planning  
College of Engineering, University of Tehran, P.O. Box 11365-4563, Iran

## **Abstract**

This paper examines the effect of price on natural gas consumption of household sector in Iran. Researchers have shown that, paying subsidies indirectly causes its consumption. Also, high income classes of society gain the most benefit of subsidies. In this study, impact of paying direct subsidy to low income classes of society for natural gas consumption is studied. Results indicate that proposed policy helps fair distribution of subsidies; furthermore it causes reduction natural gas consumption. But temporary changes of indirect payments cause inflation and needs to be controlled.

*Keywords:* natural gas, consumption, pricing, system dynamics

## **1 Introduction**

In energy planning and policy making, understanding the fundamental reasons and effects of future energy demand, fuel price and energy supply of different sources are crucially essential, and any comprehensive investigation of energy sector in a country should carefully study this complex network. For many years natural gas has been an ideal fuel in the world because of environmental advantages, hence its consumption and its production has been increased. Over 60% of energy in residential sectors of Iran is provided by gas that is used mainly for heating, water heating, cooking, ventilation and sometimes cooling. High natural gas consumption in Iran may have been caused by subsidies of government and low prices.

Subsidy is the amount which government pays to consumers in order to make sure that all classes of society have the minimum level of welfare. Therefore, purpose of energy subsidy is to help low income classes of society. But in Iran, paying subsidy indirectly (gas price is became lower than its marginal cost) has caused its high consumption by high income groups of society.

Hence, a proper energy price policy for correcting the relative price of energy carriers, improvement of consumption pattern and achieving social justice seems to be crucially essential. The solution which is usually suggested for this problem is to pay direct subsidy to low-income groups of society and supply energy with the real price to make it more goal-oriented.

Further, studies have been done concerning energy price and natural gas consumption around the world. Tabucanon has examined domestic energy consumption of Pakistan in the backdrop of government's pricing policy [9]. Jahangard has considered impact of rising energy price on expenditure and funding in rural and urban households [5]. Esmaeeli has investigated the electrical energy consumption behaviour of the household sector in response to tariff change [1]. Because of low price of natural gas in Russia, Golub has accomplished a study on rising natural gas price policy, and environmental and economical consequences of this policy [3]. Ghaderi is pointed to effect of paying subsidies directly and indirectly on the macroeconomic indicators such as inflation, per capita energy consumption and fuel smuggling [4]. Turan has used system dynamics model for considering the trend of energy supply and demand in Turkey until 2050 [10]. Ferreira has used the Regression model to show impact of energy prices on each other as substitute goods [2]. Considering the importance of natural gas consumption, different techniques are used to design its models [7, 8, 9].

## **2 Methodology**

Purpose of developed model here is, firstly to consider the effect of gas prices on domestic consumption based on present pricing systems; secondly, to analyze consequences of proposed policy on community. In order to do so, we used a systems dynamics model. For the preparation of the desired system dynamics model, the first stage is to draw cause-effect diagram between variables in the system. Prices, inflation, user population and family's consumption of different income groups are some variables that show behavioural changes in the system. As follows, the relationships between variables in the system have been reviewed. Paying direct subsidies increases per capita income, and because of demand income elasticity, energy consumption increases. Also, paying direct subsidies increases energy price and therefore, increasing family's expenditure diverts some consumer to other fuels. The most important effect of rising natural gas price is reduction of natural gas consumption of each household.

On the other hand, if the subsidy is paid directly it causes extreme inflation in the short term. Subsidy payments from two points create inflation: 1) indirect increase of other goods price resulting from increase of production costs 2) increase of liquidity, which increase the demand and thus increase the level of general price

In following, we drew state-flow diagram and wrote the equation between model factors and finally ran it and analyzed the results.

## **3 Conclusion**

Results indicate that proposed policy helps fair distribution of subsidies; furthermore it causes reduction natural gas consumption. But temporary changes of indirect payments cause inflation and needs to be controlled.

## 4 References

- [1] *Esmaeeli, Z., Shakouri G. H., Sedighi, A.*; “Investigation of pricing impact on the electrical energy consumption behaviour of the household sector by a system dynamics approach”, International Conference of System Dynamics Society.
- [2] *Ferreira, P.; Soares, I.; Araujo, M.*; “Liberalisation, consumption heterogeneity and the dynamics of energy prices”, *Energy Policy* 33, 2244–2255, (2005).
- [3] *Ghaderi, S. F.; Razmi, J.; Sedighi, A.*; “Analyses of the impact of directly subsidies on macroeconomics based on system dynamics approach”, technical faculty, vol49, No4, 527-537, (2005).
- [4] *J. Dudek; A. Golub; Strukova, E.*; “Should Russia increase domestic prices for natural gas?”, *Energy Policy* 34, 1659–1670, (2006).
- [5] *Jahangard, E.*; “Assessing the Impact of Change in Energy Prices on Inflation and Household Expenditures in Iran”, *Quarterly Energy Economics Review*, vol2, No7, 3-46, 2005.
- [6] *Javan, A.*; “Analysis of the on consumption in Iran”, 1998.
- [7] *Potocnik, P.; Thaler, M.; Govekar, E.; Grabec, I.; Poredos, A.*; "Forecasting risks of natural gas consumption in Slovenia", *Energy Policy* 35, 4271 –4282, (2007).
- [8] *Siemek, J.; Nagy, S.; Rychlicki, S.*; "Estimation of natural-gas consumption in Poland based on the logistic-curve interpretation", *Applied Energy* 7, 1– 7, (2003).
- [9] *Tabucanon, M.T.; Saeed, K.; Suhail, Q.*; “Modelling fuel pricing policy and consumption patterns”, International Conference of System Dynamics Society, (1986).
- [10] *Turan, S. B.; Basoglu, A.N.; Oner, M. A.*; “A System-Dynamic Simulation Game for Energy Sector of Turkey”, International Conference of System Dynamics Society.
- [11] *Vondracek, J.; Pelikan, E.; Konar, O.; Cermakova, J.; Eben, K.; Maly, M.; Brabec, M.*; "A statistical model for the estimation of natural gas consumption", *Applied Energy* 85, 362– 370, (2008).

# Stoffstrommanagement von Bioabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle in Biogastreibstoffen

Bernd Noche und Adel Al Mansi  
adel.al-mansi@uni-due.de  
Universität Duisburg-Essen, IPE Transportsysteme und -logistik  
Duisburg, Lotharstr. 1 – 21, 47057 Duisburg, Germany

## Zusammenfassung und Ausblick

Durch die knapper werdenden Ölvorkommen und den ständig steigenden Energiehunger der Industrieländer müssen Alternativen zur Energieversorgung gefunden werden. Die ansteigende Energienachfrage sorgt aber auch für eine drastische Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die unter anderem auch für den Klimawandel verantwortlich gemacht werden. In dem seit 2008 geltenden Klimaschutzpaket wird eine CO<sub>2</sub> Reduzierung bis zum Jahr 2020 um 40% [1] angestrebt. Um dieses Ziel zu Erreichen ist unter anderem eine Erhöhung des Anteils an regenerativen Energien zu Strom- und Wärmeversorgung vorgesehen. Innerhalb der vergangenen fünf Jahre hat sich der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch in Deutschland auf 8,6 Prozent verdoppelt [2].

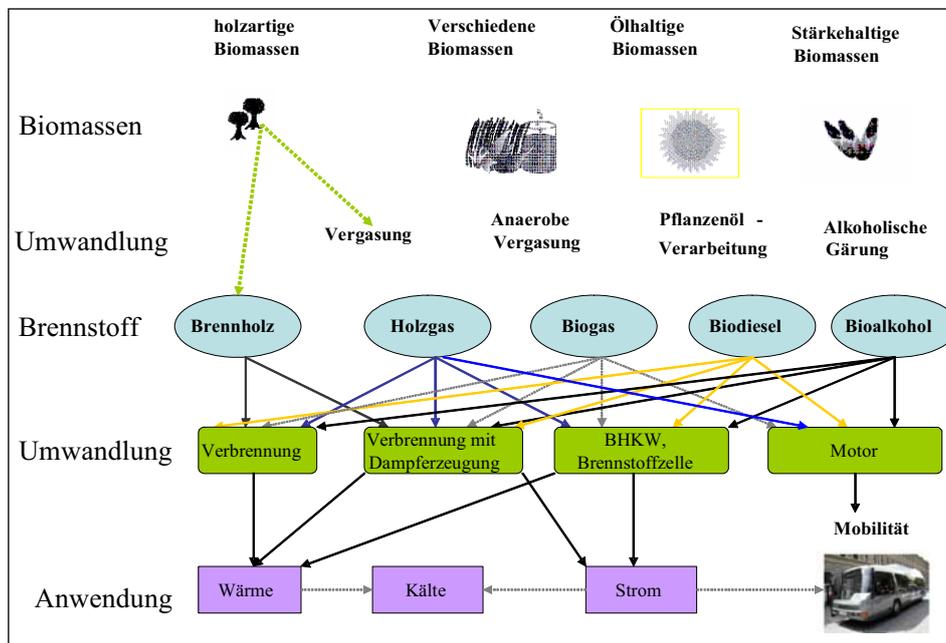
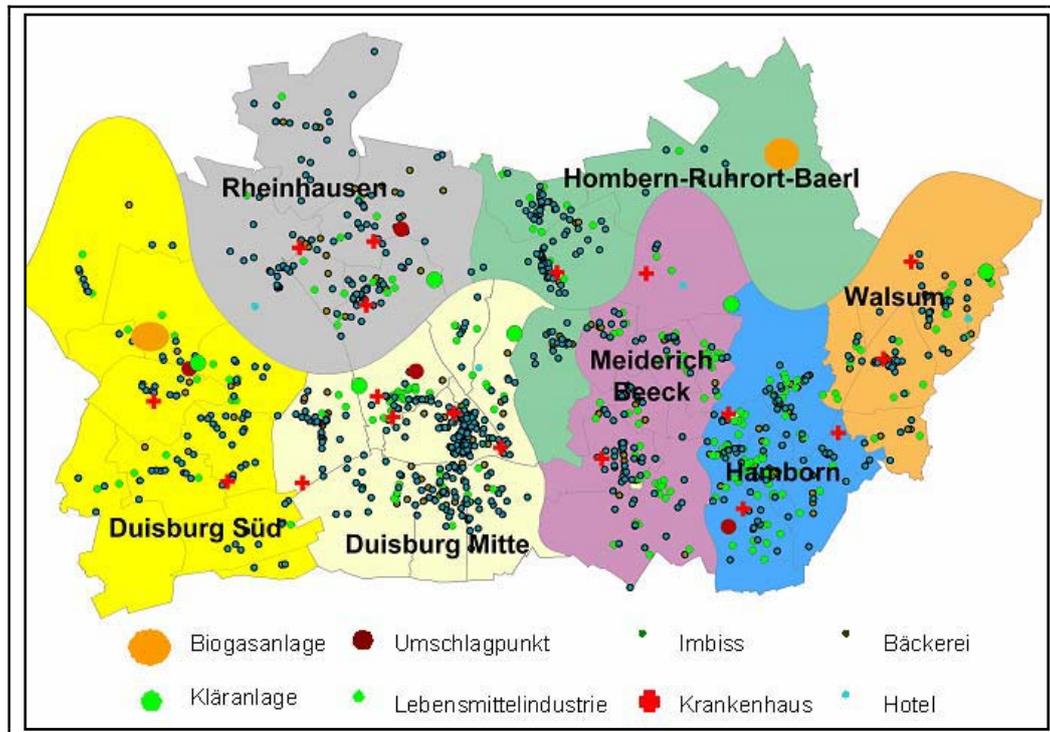


Bild 1: Energetische Nutzung von Biomassen.

Einen großen Anteil an den CO<sub>2</sub> Emissionen in Deutschland trägt neben der Industrie und der Energiewirtschaft auch die Abfallwirtschaft. Bei so genannten biogenen Abfällen aus fast allen Bereichen wie Haushalte, Industrie, Gewerbe und der Abwasserbehandlung zeigen dabei ein enormes Potenzial zur Energieversorgung und Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf [3](siehe Bild 1).

Die effiziente und ökologische Verwertung von biogenen Abfällen umfasst eine Vielzahl von logistischen Komponenten wie z. B.: Erfassungspunkte, Transporte, Lagerungen sowie produktionstechnische Anlagen (Entwässerungs-, Hygienisierungs- und Sterilisationsanlagen, Zerkleinerungs- und Sortiermaschinen) die Bestandteile der Prozessketten bei der Verarbeitung der Wertstoffe darstellen. Die Bereitstellung der biogenen Abfälle zur richtigen Zeit, in der richtigen Qualität und am richtigen Ort ist mit einem großen logistischen Aufwand verbunden, da gerade in Städten mit hoher Einwohnerzahl eine Vielzahl an Rohstoffquellen vorhanden ist. Die Kosten, die für die Bereitstellung der biogenen Abfälle entstehen, können hierbei mit den Erträgen aus der Biogasproduktion verrechnet werden, so dass die Wirtschaftlichkeit erwartet werden kann. Da es eine Vielfalt von verschiedenen biogenen Abfällen in fast allen Bereichen des heutigen Lebens gibt, erschwert dies die Erfassung der einzelnen Fraktionen. Zu den Abfallfraktionen gehören Reste aus der Lebensmittelproduktion, Küchen- und Rüstreste aus der Gastronomie und dem Gastgewerbe, Schlachtabfälle und die biogene Fraktion aus der getrennten Abfallsammlung der Haushalte, um nur einige zu nennen. Demnach sollte nach gemeinsamen Entsorgungswegen für die verschiedenen Abfallfraktionen gesucht werden, um ihre Entsorgung und Verwertung wirtschaftlicher und ökologischer zu gestalten. Es liegt somit innerhalb der Prozessketten an der Logistik die Abfälle zu erfassen, zu größeren Transporteinheiten zusammenzufassen, die räumliche Distanz zwischen Anfallsort und Verwertungsort zu überbrücken, und an den anlagentechnischen Komponenten die biogenen Rohstoffe entsprechend der geforderten Qualität aufzubereiten, beziehungsweise einer Vorbehandlung zu unterziehen (z. B. Fremdstoffe abscheiden, gewünschte Homogenität einstellen). In dieser Arbeit werden die biogenen Abfallfraktionen „Haushalte“, „Gastronomie“, „Fleischindustrie“ und „Schlämme aus der Abwasserbehandlung“, beschränkt auf das Gebiet Duisburg, im Hinblick auf die Beanspruchung von logistischen und anlagentechnischen Komponenten untersucht und bezüglich der Optimierungspotenziale der Prozessketten analysiert. Die Biogas Supply Chain umfasst die Vernetzung von Quellen, Umladestationen und Senken. Als Quellen in dieser Arbeit sind zu nennen, Haushaltungen, das Gastgewerbe, darunter Restaurants, Imbissbuden und auch Hotels und Pensionen in denen Speisereste anfallen, die Lebensmittelindustrie, darunter lediglich die Fleischindustrie und Metzgereien, und die Klärschlämme aus der Abwasserbehandlung. In all diesen Bereichen fallen große Mengen an biogenen Rohstoffen an, die einer optimalen Verwertung zugeführt werden müssen. Je nach Beschaffenheit der Biomassen und Entfernung zur Produktion, können Direkttransporte oder Transporte über Umladestationen sinnvoll sein. In den Umladestationen werden die einzelnen Rohstoffe aus den unterschiedlichen Quellen zu größeren Transporteinheiten zusammengefasst und zur Produktion (Biogasanlage) abtransportiert. Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf die Stadt Duisburg. Die Stadt unterteilt sich in 48 Stadtbezirke, wobei einigen Ortsteilen identische Postleitzahlen zugeordnet sind. Demnach werden lediglich 25 verschiedene Postleitzahlbereiche mit insgesamt 492.870 zugeordneten Einwohnern berücksichtigt [4]. Zunächst

werden die Abfallfraktionen voneinander abgegrenzt um die verschiedenen Herkunftsbe-  
reiche zu differenzieren. Anschließend werden die verschiedenen Rohstoffquellen und  
Verwertungsorte in Duisburg dargestellt.



**Bild 2:** Karte des Untersuchungsgebietes Duisburg.

Zur Berechnung der gesamten Prozessketten und der Prozessketten-Szenarien wird ein  
allgemeines mathematisches Modell vorgeschlagen. Dies beinhaltet alle Sammel- und  
Transportrouten für den Transport über Umladestationen und Direkttransporte. Die Ziel-  
funktion soll für das Nettoeinkommen aus der Abfallentsorgung und -verwertung maxi-  
miert werden. Es wurden dafür einige Annahmen getroffen:

- Die Umladestationen sind zeitlich begrenzt. Das Material in den Umladestationen  
sollte nicht länger als zwei Tage gelagert werden, denn wenn es länger als zwei  
Tage eingelagert wird, könnten Negativeffekte auftreten. Es könnte zum Beispiel  
beginnen unangenehm zu riechen.
- Die Kapazitäten der Umladestationen sind in jedem Punkt gleich.
- Die Produktionsanlage hat keine maximale Kapazität.
- Jeder Kunde wird nur von einem Fahrzeug bedient.

$$\begin{aligned}
\max P = & \underbrace{\sum_s (M_s \times E_{\text{Biogas}_s} + M_s \times E_{\text{Kompost}_s})}_{\text{Ertrag aus Biogasanlage}} + \underbrace{\sum_i (M_q \times E_{\text{Ent}_q})}_{\text{Entsorgungsgebühr}} - \underbrace{\sum_{j=Q+1}^{Q+U} (C_{\text{fix}_j} \times Z_j)}_{\text{Fixkosten}} \\
& - \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^{Q+U+P} \sum_{h=1}^{Q+U+P} \left( \underbrace{(c + cm + \text{Dis}_{kgh}) \times \frac{D_{kgh}}{V_{\text{Kap}_{gh}}}}_{\text{Sammelkosten}} + \underbrace{\left( \frac{V_{\text{Kap}_{gh}}}{2} + R_{kgh} - UL_{kgh} \right) \times C_{\text{Lager}}}_{\text{Lagerhaltungskosten}} \right) \times X_{kgh} \\
& - \underbrace{\sum_{j=Q+1}^{Q+U+P} \left( (C_{\text{hom}_j} + C_{\text{hyg}_j} \times X_{\text{hyg}_j} + C_{\text{ster}_j} \times X_{\text{ster}_j} + C_{\text{stör}_j} + C_{\text{entw}_j} \times X_{\text{entw}_j}) \left( \sum_{j=Q+1}^{Q+U+P} D_{gh} + \sum_{j=Q+1}^{Q+U+P} D_{gh} \right) \right)}_{\text{Vorbehandlungskosten}} \\
& + \underbrace{\sum_{k=1}^K \sum_{(g=Q+U+P+1)}^{(Q+U+P+D)} \sum_{(h=Q+U+P+1)}^{(Q+U+P+D)} \left( (c + cm + \text{Dis}_{kgh}) \times \frac{D_{kgh}}{V_{\text{Kap}_{gh}}} \right)}_{\text{Distributionskosten}}
\end{aligned}$$

### Nebenbedingungen

$$V_{\text{Kap}_{gh}} \leq a, \quad g = 1, \dots, Q, \quad h = Q+U+1, \dots, P \quad (1)$$

$$V_{\text{Kap}_{gh}} \leq b, \quad g = 1+Q, \dots, U, \quad h = Q+U+1, \dots, P \quad (2)$$

$$D_{kgh} \leq \text{maxServ} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^{Q+U+P} X_{ikh} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{g \in v} \sum_{h \in v} \sum_{K=1}^k X_{ikh} \geq 1, \quad \forall (v, \bar{v}) \quad (5)$$

$$\sum_{g=1}^{Q+U+P} X_{hgk} - \sum_{g=1}^{Q+U+P} X_{ghk} = 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad h = 1, \dots, Q+U+P \quad (6)$$

$$\sum_{j=1+Q}^{Q+U} \sum_{i=1}^K X_{ijk} \leq 1, \quad k = 1, \dots, k \quad (7)$$

$$\sum_{j=1+Q+U}^{Q+U+S} \sum_{i=1}^K X_{ijk} \leq 1, k = 1, \dots, k \quad (8)$$

$$\sum_{h=1}^{Q+U+P} X_{ihk} + \sum_{h=1}^{Q+U+P} X_{jhk} - Y_{ij} \leq 1, i = 1, \dots, N, j = N+1, \dots, Q+U+P, k = 1, \dots, K \quad (9)$$

$$X_{kgh} = \{0,1\}, g = 1, \dots, Q+U+P, h = 1, \dots, Q+U+P, k = 1, \dots, K \quad (10)$$

$$Z_j = \{0,1\}, j = Q+1, \dots, Q+U+P \quad (11)$$

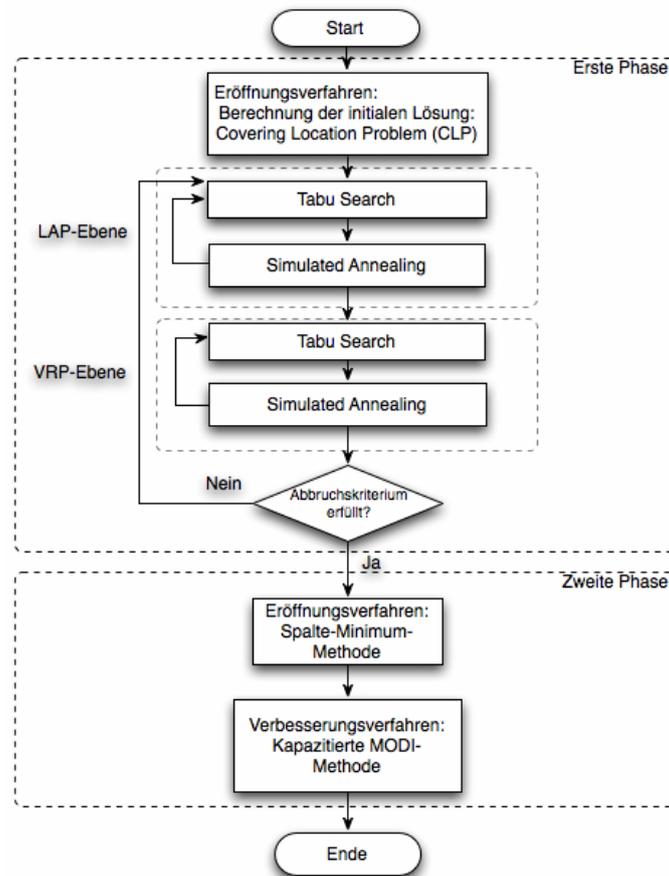
$$Y_{ij} = \{0,1\}, i = 1, \dots, Q, j = Q+1, \dots, Q+U+P \quad (12)$$

Die Nebenbedingungen (1) und (2) begrenzen die Kapazität des Fahrzeuges. Die Nebenbedingung (3) sorgt dafür, dass die Kapazität der Umladestation nicht überschritten wird. Um die Annahmen des Modells zu erfüllen, wird mit der Nebenbedingung (4) jeder Kunde nur einer Route zugeordnet. Dann garantiert (5), dass jede Route mit gleichem Umladestation bzw. Biogasanlage versorgt. Mit der nächsten Nebenbedingung (6) wird gesichert, dass der Ankunftspunkt des Fahrzeuges zugleich auch der Abfahrtspunkt sein soll. Die Nebenbedingungen (7) und (8) dienen dazu, dass eine Tour nicht mehr als eine Umladestation bzw. Biogasanlage bedient wird. Die Nebenbedingung (9) ist zuständig dafür, dass ein Kunde nur einem Depot zugeordnet werden soll, wenn es eine Tour gibt, die bei diesem Kunden vorbeifährt. Nebenbedingung (10), (11) und (12) sichert, dass die Entscheidungsvariablen entweder den Wert 1 oder 0 nehmen.

In den untersuchten Gebieten soll alle 14 Tage die Bioabfallsammlung durchgeführt werden. Das heißt, dass das Sammelfahrzeug alle zwei Wochen alle Knoten mindestens einmal besucht und anschließend werden die gesammelten Rohstoffe zum Umschlagpunkt oder Kläranlage gebracht. Um eine Tour zu bestimmen, könnten folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Kapazität des Umschlagpunktes oder der Kläranlage,
- Kapazität des Sammelfahrzeugs,
- Arbeitszeiten von Fahrer und Sammlungspersonal,
- Beladezeit pro biogenen Abfallquelle(Haus, Imbiss usw.),
- Rüstzeit und Umfahrt.

Mit der entwickelnden Software werden die Touren geplant, in dem man die Kunden, Umschlagpunkte und Biogasanlagen verbindet. Ein allgemeiner Ablauf des Algorithmus wird in der Bild 3 vorgestellt.



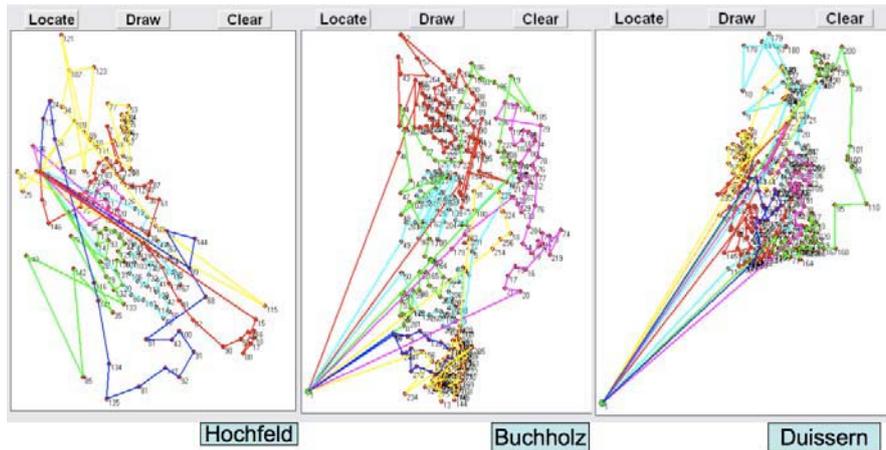
**Bild 3:** Prozessschaubild der vorgeschlagenen heuristischen Ansätze.

Aus diesem Prozessschaubild kann ein Programm zur Festlegung der erforderlichen Umschlagpunkte (LAP) und Berechnung der kürzesten Route (VRP) erstellt werden. In einer zweiten Phase wird der Transport zwischen Umschlagpunkten und Biogas- bzw. Kläranlagen behandelt. Dafür werden einige Annahmen getroffen:

- Alle Umladestationen besitzen die gleiche Kapazität
- Alle Produktionsanlagen besitzen die gleiche Kapazität
- Alle Sammelfahrzeuge besitzen die gleiche Kapazität
- Alle Transportfahrzeuge besitzen die gleiche Kapazität
- Alle Sammelfahrzeuge fahren maximal drei Touren pro Tag
- Die Summe der Kapazitäten der Umladestationen ist gleich der Gesamtkapazität aller Quellen
- Die Summe der Kapazitäten der Produktionsanlagen ist gleich der Gesamtkapazität aller Quellen

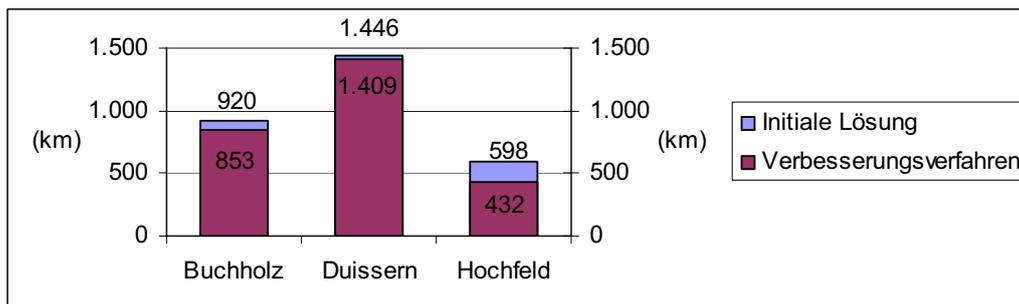
## Ergebnis der Simulation

Das Simulationstool optimiert dabei anhand heuristischer Verfahren die gesamte Routenlänge und trägt somit direkt zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung und zur Minimierung der Kosten für die Logistik bei. In der Bild 4 wird gezeigt, wie die Routen durch das Simulationsmodell für die drei Ortsteile erzeugt wurden.



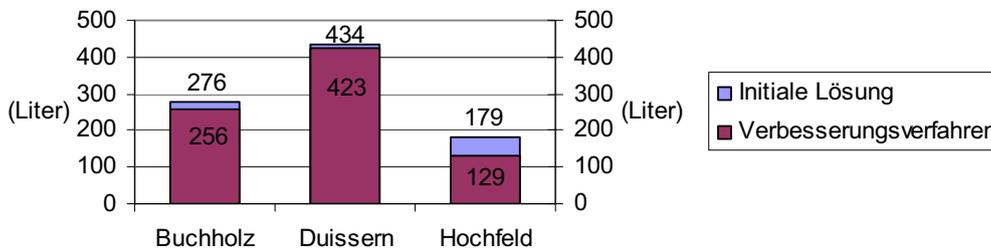
**Bild 4:** Berechnete Routen der drei Ortsteile.

Bei der Simulation wurden drei Ortsteile berücksichtigt. Bei den drei Ortsteilen wurden eine Sammelmenge von bis zu 206 Mg Biorohstoffe pro zwei Wochen erfasst. Im Jahr werden bis zu 5376 Mg Biorohstoffe bei den drei Ortsteilen gesammelt (siehe Abb.8.6). Es wurde eine Transportstrecke von bis 114 km pro zwei Wochen berechnet. Durch die Verbesserungsverfahren ist die Transportstrecke auf 103 km pro zwei Wochen reduziert (siehe Abb.5). Es wird angenommen, dass die Bioabfälle mit einem LKW von 12 Mg Kapazität gesammelt wurden.



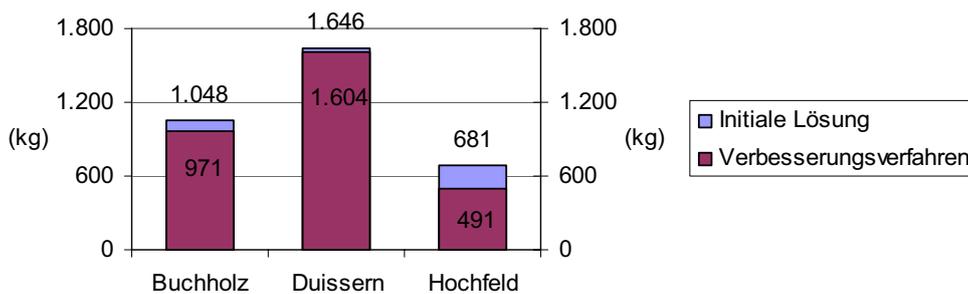
**Bild 5:** Jährliche Bioabfall Sammelstrecke.

In der Bild 6 wird gezeigt, wie der Dieserverbrauch pro 100 km für das ganze Jahr verbraucht wird.



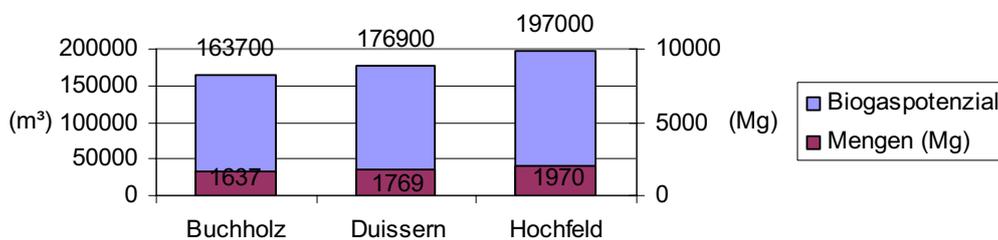
**Bild 6:** Jährliche Dieserverbrauch.

Im Bezug auf die CO<sub>2</sub> Emission wurde angenommen, dass pro 1 Km 1,138 kg CO<sub>2</sub> ausgestoßen wird[7]. Das ergibt eine Summe von 3365 kg Pro Jahr CO<sub>2</sub>-Emission. Durch die Verbesserungsverfahren hat sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf 307 Kg reduziert (siehe Abb. 7).



**Bild 7:** Ausstoß der CO<sub>2</sub> Emission in einem Jahr.

Die Sammlung von 5376 Mg Biorohstoffen ergibt sich ein Biogaspotenzial von 537600 m<sup>3</sup>. Diese Menge entspricht 424704 kg Biogas. Ein LKW von 12 Mg Kapazität verbraucht pro 100 km bis zu 30 kg Biogas. Die Gesamtsammelstrecke pro Jahr bei allen drei Ortsteilen liegt bei 2964 Km. Um den Energieverbrauch des LKW für die Gesamtstrecke mit Biogas abzudecken, braucht man bis zu 889,2 kg (Biogas)



**Bild 8:** Verhältnisse von Abfallmenge und Biogasausbeute in drei Ortsteilen.

Ein Abfallsammelfahrzeug mit Gasbetrieb kostet 15000 € bis 30000 € mehr als ein vergleichbares Fahrzeug mit Dieselmotor. Prozentual betrachtet sind diese Mehrkosten bei der Anschaffung von 4% bis 9 %. Die Fahrzeuge mit Gasantrieb zeigen aber im Betrieb die günstigeren Kraftstoffkosten. Bei einer Ersparnis von 20,25€ pro 100km ergibt sich bei einer Fahrstrecke von 25000km eine Ersparnis von 5062,5€ pro Jahr. Damit amortisieren sich die Mehrkosten von 15000 € bereits nach ca. 3 Jahren. Die Kosten für Diesel und Biogas stammen aus den Quellen [8] und [9]. Bei Diesel handelt es sich dabei um den mittleren Dieselpreis von 2008. Legt man einen Dieselpreis von 1,509 € zugrunde (dies war der Dieselpreis vor der Wirtschaftskrise), ergibt sich eine Ersparnis von 50,91€ pro 100 km. In diesem Fall, hätten sich die Mehrkosten von 15000€ bereits nach 1,2 Jahren amortisiert. Bei einer CO<sub>2</sub>-Ersparnis von 35,95 kg pro 100km ergibt sich bei einer Fahrstrecke von 25000km pro Jahr und einer Lebensdauer von 15 Jahren eine CO<sub>2</sub>-Ersparnis von 135 t CO<sub>2</sub>. Die recherchierten Mengen der hier betrachteten Abfälle liefern für Duisburg eine theoretische Biogasmenge von 8.636.330 m<sup>3</sup>/Jahr. Natürlich ist dabei festzuhalten, dass die hier bestimmten Rohstoffmengen in der Realität deutlich abweichen können. Die vorgelegte Arbeit schlägt ein Gesamtkonzept zur Simulation von Prozessketten mit logistischen und anlagentechnischen Komponenten zur Bereitstellung von biogenen Abfallstoffen vor. Dabei werden gleichermaßen die logistischen Komponenten (Erfassung, Transport oder Lagerung) und anlagentechnische Komponenten (Entwässerungs-, Zerkleinerungs- und Sortiermaschinen, Hygienisierungs- und Sterilisierungsanlagen) betrachtet. Durch das erweiterte mathematische Modell ist es möglich die gesamte Supply Chain vom Anfallsort bis zum Ort der Verwertung zu berechnen. Dabei werden auch Direktfahrten zwischen Quellen und Verwertungsorten berücksichtigt. Mit der gesamten Fahrstrecke kann die durch den Transport- Sammelprozess verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt werden. Die Produktion von Biogas in den Klärwerken äußerst sinnvoll, da so die Transportleistungen für den Klärschlammtransport wegfallen würden. Zudem müssten, bei einer entsprechenden Vorbehandlung der anderen drei Fraktionen in den Umladestationen, keine neuen technischen Komponenten in den Klärwerken installiert werden. Die Abfallfraktion „Schlämme aus der Abwasserbehandlung“ ist nur beschränkt für einen Abfall-Mix aus den hier betrachteten Fraktionen geeignet. So hat sich herausgestellt, dass die Aufbereitungs- und Vorbehandlungskosten der Klärschlämme stark von denen der anderen Fraktionen abweichen. Aus diesem Grund erscheint es wirtschaftlicher, die biogenen Abfälle aus Haushalten, Speiseabfälle und „Abfälle aus Lebensmittelindustrie“ in die Klärwerke zu transportieren und gemeinsam mit den „Abfällen aus der Abwasserbehandlung“ in den betriebseigenen Faultürmen der Klärwerke zu Biogas zu verwerten. Der Schwerpunkt der Betrachtungen im Hinblick auf die Szenarien lag bei der Identifizierung der für die Bereitstellung erforderlichen technischen und logistischen Prozesse, die der Gesetzgeber für die Behandlung von biogenen Abfallstoffen zwingend vorschreibt. Die gemeinsame Vorbehandlung der verschiedenen Abfallfraktionen geht jedoch mit einigen Problemen einher. So sind für die „Abfälle aus den Haushalten (Biotonne)“ keine hygienischen Auflagen zu erfüllen, während die „Speiseabfälle“ hygienisiert werden müssen. Um diese einer gemeinsamen Vorbehandlung zu unterziehen, muss gewährleistet sein, dass die Hygienevorschriften weiterhin eingehalten werden. Diese Menge an Biogas würde bei Annahme, dass 1 m<sup>3</sup> Biogas ca. 5,8 Kilowattstunden erzeugt, eine theoretische elektrische Leistung von 50.090.716 Kilowattstunden pro Jahr liefern[10]. Natürlich ist

dabei festzuhalten, dass ein Teil (20%) der erzeugten Energie aus dem Biogas für die Vorbehandlungs- und Aufbereitungsprozesse in den Produktionsanlagen verwendet wird. Laut Energie-Agentur -NRW ist der jährliche Stromverbrauch pro Haushalt pro Person ohne Heizstromverbrauch 2000 kWh[11]. Mit dem Strompotenzial von 40.072.573 Kilowattstunden pro Jahr, kann bis zu 20000 Einwohnerstromverbrauch Pro Jahr abgedeckt wird.

## Literatur

- [1] *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Wärme aus Erneuerbaren Energien, was bringt das neue Wärme Gesetz? Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, 2008.*
- [2] *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Erneuerbare Energien kräftig im Aufwind: Anteil an der Stromversorgung bereits bei 14 Prozent, Berlin, 2008.*
- [3] *Leible, L., A. Arlt, H. Seifert, S. Kälber, E. Nieke, D Wintzer und B. Fürniß, (2002): Stand und Perspektiven in Deutschland In: Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (Hrsg.): Tagungsbericht 2002-2.*
- [4] *Stadt Duisburg: Einwohnerstatistik, GFW Duisburg: Gesellschaft für Wirtschaftsförderung Duisburg mbh, 2008.*
- [5] *AIDA - Informationsplattform Abfall in NRW, <http://www.abfall-nrw.de/aida/>*
- [6] *GERTEC: Potentialanalyse regenerative Energiequellen in Duisburg, Endbericht, Essen, 2008.*
- [7] *Urban, A.I.; Halm, G.; Weber: Optimierung der Abfall-Logistik, Kassel University Press, S. 65 – 80, 2005.*
- [8] *Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.: Dieselpreis-Information: <http://www.bgl-ev.de/images/downloads/initiativen/dieselpreisinformation.pdf?ms=206>*
- [9] <http://www.wendland-elbetal.de/index.php?id=57,91,0,0,1,0>
- [10] [http://www.voelklinger-vb.de/gav/biogasanlage/Haeufig\\_gestelle\\_Fragen/FAQs.html](http://www.voelklinger-vb.de/gav/biogasanlage/Haeufig_gestelle_Fragen/FAQs.html)
- [11] *EAN (2007): Kurzinfor 2007, Dortmunder Energie- und Wasserversorgung.*

# Möglichkeit zu Monitoring und Simulation im Bereich der Gasautomation am Beispiel eines virtuellen Kraftwerks auf Mikro-BHKW-Basis

Christian Müller  
Christian.Mueller1@aut.tu-freiberg.de  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Freiberg  
Lessingstraße 45, 09596 Freiberg

Prof. Dr. Andreas Rehkopf  
Andreas.Rehkopf@aut.tu-freiberg.de  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Freiberg  
Lessingstraße 45, 09596 Freiberg

## Kurzfassung

Auf Grund des stetig voranschreitenden Klimawandels und der Verknappung fossiler Energie-Ressourcen mit den damit verbundenen dramatisch steigenden Energiepreisen ist eine effizientere Energieausnutzung zwingend erforderlich. Einen Ansatz dafür bilden Mikro-Blockheizkraftwerke (MBHKW) auf Basis einer Kraft-Wärme-Kopplung, die einen Gesamtwirkungsgrad von über 90% erreichen können. Der Beitrag gibt einen Ansatz für das Monitoring und die Simulation eines virtuellen Kraftwerkes, d.h. eines Verbundes von MBHKW-Anlagen.

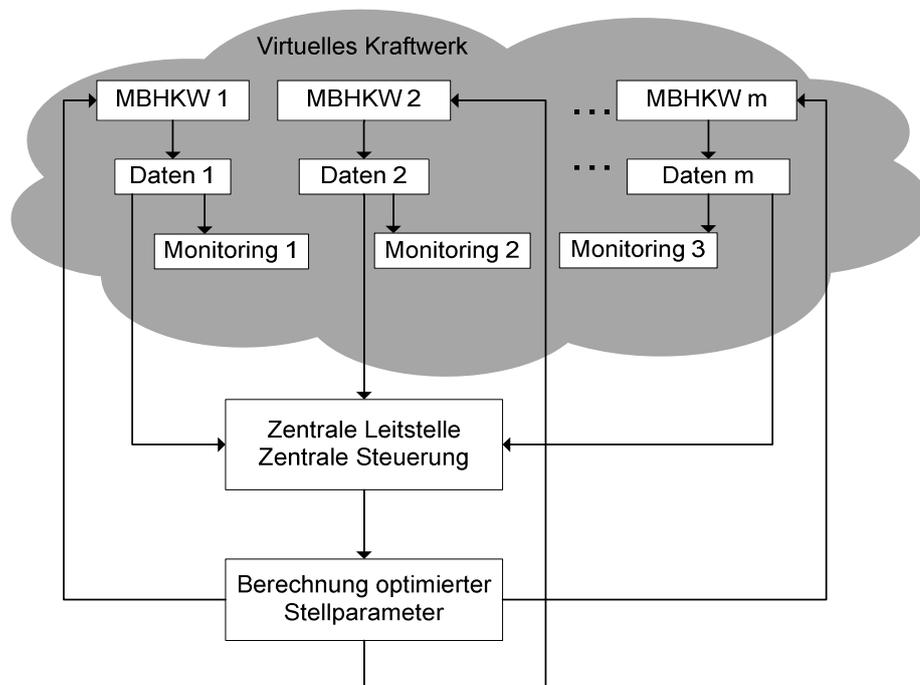
## 1 Einleitung

Heutzutage werden dringend Lösungen gesucht, den fortschreitenden Klimawandel aufzuhalten. Einer der größten Verursacher der Klimaerwärmung ist CO<sub>2</sub>. Eine Möglichkeit, die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft längerfristig zu verringern, ist die gleichzeitige Nutzung von Strom und Wärme direkt am Ort des Bedarfs. Dieses Prinzip wird als Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet. Das Institut für Automatisierungstechnik der TU Bergakademie Freiberg untersucht diese Technik am Beispiel von MBHKWs.

MBHKWs für den privaten Gebrauch sind auf zwei verschiedene Arten konzipierbar. Die erste Variante ist das sogenannte stromgeführte MBHKW, welches primär Strom und als Nebenprodukt Wärme produziert. Den größten Marktanteil besitzt das wärmegeführte MBHKW. Dieses ist auf den Wärmelastgang eines (Einfamilien)-Hauses ausgelegt. Der als Nebenprodukt anfallende Strom kann im Haus abgenommen werden oder wird ins öffentliche Stromnetz zurückgespeist, mit einer entsprechenden Vergütung durch den Netzbetreiber. Mit dieser parallelen Wärme- und Stromnutzung am Entstehungsort muss weniger Strom und Wärme aus den öffentlichen Netzen bezogen werden, was wiederum zu einer geringeren Auslastung der Kohlekraftwerke und damit zu einem geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß führt.

## 2 Monitoring eines virtuellen Kraftwerks

Zur Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz können die einzelnen autarken MBHKWs zu einem sogenannten virtuellen Kraftwerk zusammengefasst werden. Dieses besteht aus mehreren einzelnen dezentral verteilten Energieerzeugern und einer zentralen Leitung. Dieses Konzept bietet sich v.a. für ländliche, autarke Regionen an, in denen die einzelnen Haushalte den benötigten Strom und evtl. die Wärme selbst produzieren. Damit sind diese Gebiete von einem meist weit entfernten Strom- und Wärmeproduzenten unabhängig. In diesen Gebieten kann sich somit ein sogenannter *Inselbetrieb* herausbilden [1]. Für eine zentrale Steuerung müssen in einer Leitstelle sämtliche erfassten Daten aller MBHKWs aufgezeichnet und ausgewertet werden (siehe Bild 1).



**Bild 1:** Struktur eines optimierten/ geregelten virtuellen Kraftwerks

Für die lokale Datenerfassung steht jedem MBHKW ein eigener BHKW-PC zur Verfügung. Auf diesem kommt das an der TU Freiberg erstellte Monitoringsystem OMaCS (Online Management and Control System) zum Einsatz [2]. Damit ist eine Fernüberwachung der Anlagen möglich. Weiterhin werden alle Messwerte in einer Datenbank abgelegt und können grafisch dargestellt und analysiert werden.

### 3 Simulation eines virtuellen Kraftwerks

Die Aufgabe eines virtuellen Kraftwerks ist die bessere Ausnutzung und Optimierung des Betriebsverhaltens der einzelnen MBHKWs. Für eine möglichst effiziente „Fahrweise“, d.h. um das Taktungsverhalten der einzelnen Anlagen zu regeln, muss ein optimaler Fahrplan ermittelt werden. Dies führt auf die Aufgabe einer kombiniert hierarchisch-dezentralen Optimierung, in der unter Beachtung von Nebenbedingungen verschiedene Zielfunktionen berücksichtigt werden müssen, z.B. Stromeinkauf vom Netzbetreiber, Stromverkauf, Netzauslastung, Bereitstellung von Regelleistung, Betriebsdauer usw.. Als geeignete Modellierungs- und Simulationsmethodik hat sich die Theorie ereignisdiskreter Systeme herausgestellt [3], kombiniert mit Methoden der diskreten Optimierung [4], was an folgendem Beispiel einfach illustriert werden kann:

$a_k$  Strombedarf von BHKW  $k, k = 1, \dots, n$

$w_{k,l}$  transportierte Stromeinheiten von BHKW  $k$  zu BHKW  $l$

$S^- = \{k: a_k < 0\}$  Indexmenge BHKWs mit Stromdefizit

$S^+ = \{k: a_k > 0\}$  Indexmenge BHKWs mit Stromüberschuss

Elementare Zielfunktionen :

$$\sum_{i \in S^-} a_i \rightarrow \min$$

$$\sum_{j \in S^+} a_j \rightarrow \max$$

$$\sum_{\substack{k,l \in \{1, \dots, n\}, \\ k \neq l}} w_{k,l} \rightarrow \min$$

Ist dieser optimale Betriebspunkt gefunden bzw. berechnet worden, wird ein Modell in MATLAB / Simulink / Stateflow erstellt, welches ein virtuelles Kraftwerk beschreibt. Verschiedene Testszenarios müssen betrachtet werden, z.B. Ausfall eines oder mehrerer BHKWs, Kompensation von Peaks in Spitzenlastzeiten, stark unterschiedlicher Bedarf an Strom und Wärme usw. um eine effiziente Fahrweise zu gewährleisten. Deshalb ist für eine Simulation ein möglichst genaues und lang dokumentiertes Lastgangverhalten vom Standort des MBHKWs notwendig, um so z.B. typische saisonale Schwankungen zu berücksichtigen und in der Gesamtsumme eine effizientere Fahrweise zu gewährleisten.

## 4 Literatur

- [1] *Mittlböck, M. et al.*: Virtuelle Kraftwerke für autarke Regionen (2007), Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich
- [2] *Bräuer, D.*; *Rehkopf, A.*: Online Management and Control System for growing of monocrystal semiconductor materials in multi-zone furnaces, Tagungsband: S. 1072– 1075, IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2008, Hamburg
- [3] *Rehkopf, A.*: Modellierung, Analyse / Synthese und Optimierung parallelläufiger ereignisdiskreter Prozesse mit der Max-Plus-Algebra. Theorie ereignisdiskreter Systeme (Herausgeber D. Abel / K. Lemmer), Lehrbuch Oldenbourg 1998.
- [4] *Heil, S.*: Erweiterung derzeitiger Mautsystemen zur optimalen Gebührenerfassung und Verkehrs. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der TU Bergakademie Freiberg 2005.

# **Schadstoffbilanzierung mittels gekoppelter instationärer Strömungs- und Stofftransportmodelle des Boden- und Grundwasserbereichs auf Basis generierter Zeitreihen**

Ralf Junghanns, René Blankenburg, Peter-Wolfgang Gräber  
ralf.junghanns@tu-dresden.de, rene.blankenburg@tu-dresden.de,  
peter-wolfgang.graeber@tu-dresden.de  
Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden,  
Pratzschwitzer Straße 15, 01796 Pirna

## **1 Einleitung**

In vielen Ländern weltweit stellt die Nutzung von Grundwasserressourcen zur Gewinnung von Wasser für die öffentliche Wasserversorgung das wichtigste Standbein der Trinkwasserversorgung dar. Selbst in Ländern, in denen verstärkt Oberflächenwasser verwendet wird, ist das vorhandene Grundwasser eine wichtige Ressource. In Deutschland betrug der Anteil des Grundwassers an der öffentlichen Wasserversorgung im Jahre 2004 74% (Quelle: Statistisches Bundesamt). Eine große Gefährdung für die Qualität des Grundwassers und damit auch für den Menschen stellen Altlasten dar. Durch Kontaminationen der obersten Bodenschichten werden Schadstoffe mit dem Sickerwasser aus der ungesättigten Bodenzone ausgewaschen und ins Grundwasser eingetragen. Dort bilden sich durch Transportvorgänge Schadstofffahnen aus.

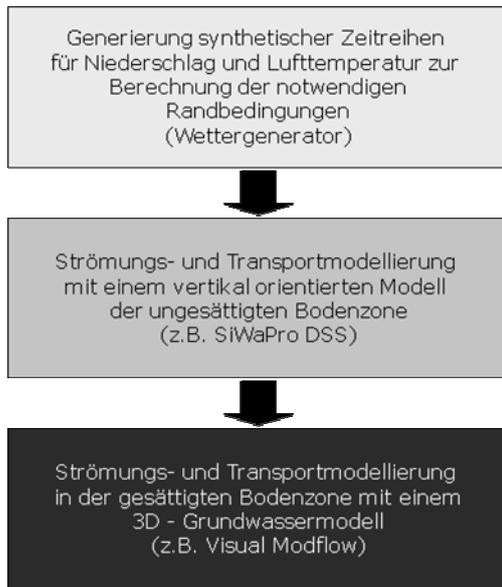
Voraussetzung für die Abschätzung des Gefährdungspotentials ist die Beschreibung der Vorgänge in den drei Bereichen Atmosphäre, ungesättigte Bodenzone und Grundwasser. Für jeden dieser Bereiche existieren getrennte Modellansätze, welche die dort stattfindenden instationären Prozesse hinreichend genau nachbilden können.

Für die geschlossene Darstellung des Wirkungspfades Atmosphäre → Grundwasser können die Modelle der einzelnen Kompartimente beispielsweise über die Randbedingungen gekoppelt werden.

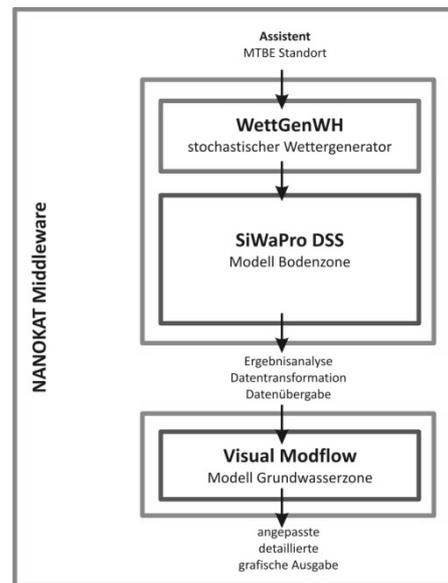
## **2 Konzept des Programms NANOKAT Middleware**

Die Software NANOKAT Middleware ist ein Werkzeug für die instationäre Simulation des Untergrundes unter Berücksichtigung von Strömung, Temperatur, Stofftransport, Sorption und Abbau. Sie beruht auf der Kopplung von zwei, am Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten entwickelten Simulationswerkzeugen, WettGenWH (Wettergenerator für den Wasserhaushalt) und SiWaPro DSS (Sickerwasserprognose Decision Support System) mit einem instationären Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell (Visual MODFLOW).

Das gekoppelte Standortmodell betrachtet den instationären Schadstoffstrom über die jeweiligen Grenzen der Einzelmodelle hinweg und trifft damit durch Langzeitsimulationen wichtige Aussagen über den Kontaminierungsgrad der einzelnen Bereiche. Es können punktuelle Gegenmaßnahmen zur Sanierung der Schadstoffeinträge erarbeitet werden, bzw. können auch schon bestehende Sanierungsmaßnahmen optimiert werden.



**Abbildung 1: Gekoppelte Module zur Strömungs- und Transportmodellierung**



**Abbildung 2: Gesamtkonzept der NANOKAT Middleware**

### 3 Generierung atmosphärischer Randbedingungen

Eingangsdaten für die instationäre Simulation des Bodenwasserhaushalts der ungesättigten Zone sind synthetische Zeitreihen für Niederschlag an der Bodenoberfläche, potentielle Bodenverdunstung, potentielle Transpiration sowie Temperatur, die mit dem Wettergenerator (WettGenWH) erzeugt wurden.

Neben der Option der Einspeisung eigener langjähriger Klimadaten werden auch die in täglicher Auflösung vorliegenden Daten von 44 deutschen Klimastationen des DWD angeboten. Auf Basis vorhandener Wetterdaten umliegender Klimastationen können Zeitreihen beliebiger Länge für den betrachteten Standort generiert werden. Dabei werden auch Standortfaktoren wie Hangneigung und -exposition, Interzeption von Pflanzen, Landnutzung und Bewuchs berücksichtigt.

#### Generierung synthetischer Niederschlagszeitreihen

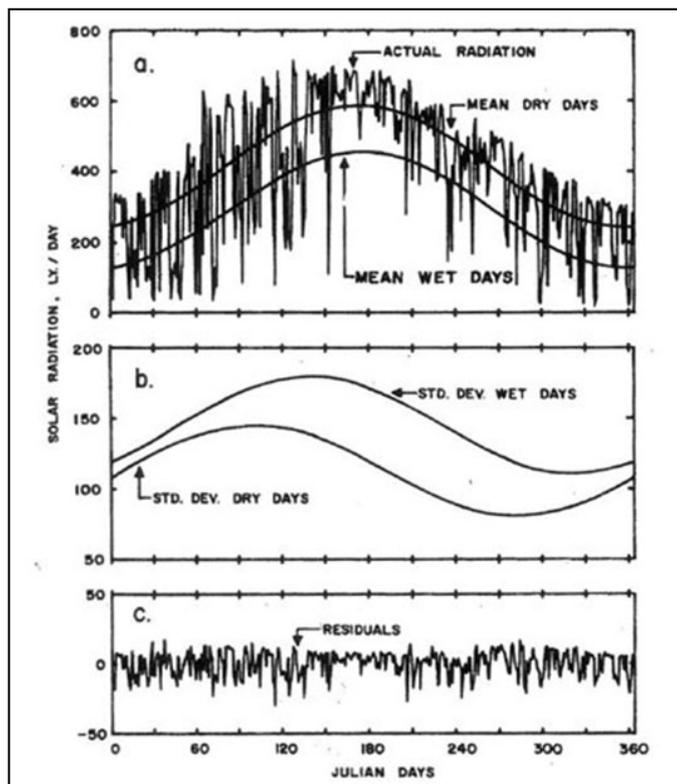
Für die Generierung synthetischer Niederschlagszeitreihen sind zwei Ansätze nötig. Zum einen wird mit Hilfe der MARKOV-Kette bestimmt, ob es an einem Tag regnet, zum anderen wird für die Regentage die Niederschlagsmenge durch eine geeignete Verteilungsfunktion berechnet. Saisonale Veränderungen werden dadurch berücksichtigt, dass ein Jahr in 26 Datensätze von je 14 Tagen aufgeteilt. Aus der Analyse der langjährigen Wetterdaten werden Kennwerte bestimmt, die als Basis für die Generierung dienen.

Die MARKOV-Kette erster Ordnung beschreibt die Beziehung zwischen dem Zustand (feucht oder trocken) des generierten Tages zum Zustand des vorigen Tages. Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Regentag auf einen trockenen oder feuchten Tag folgt.

Für die Beschreibung der Niederschlagsmenge wird eine zweiparametrische WEIBULL-Verteilung verwendet.

### Generierung synthetischer Zeitreihen für Temperatur und Strahlung

Temperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit werden mittels eines kontinuierlichen, multivariaten stochastischen Modells nach RICHARDSON [7] erzeugt, bei dem die Mittelwerte und Standardabweichungen abhängig vom Niederschlagszustand des Tages sind.



**Abbildung 3: Reduktion von Zeitreihen der täglichen Sonneneinstrahlung in eine Zeitreihe von Restelementen (aus [7])**

Dabei werden die Zeitreihen jeder der drei Variablen auf Zeitreihen von Restelementen reduziert, indem Mittelwerte und Standardabweichungen entfernt werden (Abbildung 3). Zusätzlich werden Autokorrelationskoeffizienten für jede Reihe und Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen jedem Variablenpaar ermittelt. Auch hier werden alle Werte für einen 14-tägigen Zeitschritt berechnet. Für die Generierung erfolgt die Transformation von Mittelwert und Standardabweichung in Tageswerte unter Verwendung der Spline-Interpolation.

Das von RICHARDSON [7] beschriebene Verfahren wurde für den Wettergenerator um zwei weitere Variablen erweitert. Neben minimaler- und maximaler Tagestemperatur sowie Sonneneinstrahlung werden zusätzlich mittlere Tagestemperatur und mittlere Feuchttemperatur generiert.

### Interpolation statistischer Kennwerte für unbekannte Standorte

Der Wettergenerator bietet die Möglichkeit der Generierung synthetischer Klimazeitreihen für Standorte, die nicht mit einer von den 44 Stationen des DWD übereinstimmen. Dies ist möglich durch die Ermittlung der statistischen Kenngrößen von umliegenden Klimastationen und die räumliche Interpolation (inverse Distanzen) dieser Kenngrößen auf den jeweiligen Standort. Dafür sind mindestens 3 DWD-Stationen nötig, die, um die Plausibilität der Kenngrößen zu erhalten, auf der gleichen Höhe liegen sollten. Alternativ kann man ein Interpolationsverfahren verwenden, welches die Stationshöhen ebenfalls berücksichtigt.

## 4 Kopplung WETTGENWH – SIWAPRO DSS

Die Kopplung der beiden Modelle erfolgt über die Vorgabe von zeitabhängigen Randbedingungen für die oberen Modellgrenzen. Dabei können Zeitreihen in quasi beliebiger zeitlicher Auflösung für Niederschlag, potentielle Bodenevaporation, potentielle Transpirationsleistung von Pflanzenwurzeln sowie Temperatur vorgegeben werden. Auf diese Weise ist es möglich, extreme Niederschlagsereignisse mit hoher Intensität, wie sie durch Klimaprognosen für einige Regionen Deutschlands vorhergesagt werden und das damit verbundene Verhalten des Bodens (Versickerungsleistung, Oberflächen-Runoff) zu simulieren. Zum aktuellen Entwicklungsstand erzeugt das Modell WettGenWH Zeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag in beliebiger Länge.

## 5 Simulation der Prozesse in der ungesättigten Bodenzone

Im Rahmen früherer Vorhaben wurde am Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der Technischen Universität Dresden das Programmsystem SiWaPro DSS zur Beschreibung der Prozesse in der ungesättigten Bodenzone entwickelt [1]. Es basiert auf einem physikalischen Bodenwasserhaushaltsmodell, bei dem die Simulation der Strömungsprozesse auf der Grundlage der RICHARDS-Gleichung (1) und die Simulation der Transportprozesse auf Basis der Konvektions-Dispersions-Gleichung (3) erfolgen.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

Die Variable  $\theta$  stellt den volumetrischen Wassergehalt dar,  $h$  die Druckhöhe,  $x_i$  (für den vertikal-ebenen-Fall  $x_1=x$  und  $x_2=z$ ) sind die räumlichen Koordinaten,  $t$  die Zeit,  $K_{ij}^A$  sind die Komponenten des dimensionslosen Anisotropie-Tensors  $\mathbf{K}$  und  $K$  die Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Die Größe  $S$  repräsentiert den Speicher- und Senkenterm und kann u.a. durch das Volumen an Wasser charakterisiert werden, welches durch Pflanzenwurzeln dem Boden entzogen wird.

Der Wassergehalt  $\theta_b$  ( $b$  steht für die benetzende Phase Wasser) ist abhängig von der kapillaren Druckhöhe in den Poren und kann mit Gleichung (2) bestimmt werden (van-Genuchten-Luckner-Gleichung). Dabei ist zu beachten, dass diese Zustandsfunktion hystereseeähnlich ist, also abhängig von der Prozessrichtung. Sich ändernde Grundwasserspiegel oder Trocken- und Feuchtperioden sowie deren Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt lassen sich so komplexer simulieren.

$$\theta_b = A + \frac{\phi - A - B}{\left[1 + (\alpha \cdot p_{c,b-nb})^n\right]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

Die Variable  $A$  stellt hierbei den Restwassergehalt dar,  $B$  den Restluftgehalt.  $\phi$  kennzeichnet die Porosität des Mediums (Boden) und  $p_{c,b-nb}$  charakterisiert den Kapillardruckunterschied zwischen der benetzenden (Wasser) und der nichtbenetzenden Phase (Luft). Die Parameter  $\alpha$  (Maßstabsfaktor) und  $n$  (Anstiegsparameter) sind empirische Parameter, welche in [8] näher beschrieben werden.

Die partielle Differentialgleichung zur Beschreibung des instationären chemischen Stofftransports in einem ungesättigten porösen Medium kann geschrieben werden als

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c}{\partial x_i} + \mu_w \theta c + \mu_s \rho s + \gamma_w \theta + \gamma_s \rho - S c_s, \quad (3)$$

wobei  $c$  die Konzentration des gelösten Schadstoffes ist,  $s$  die sorbierte Konzentration,  $t$  die Zeit,  $q_i$  ist die  $i$ -te Komponente des Volumenstroms,  $D_{ij}$  ist der Tensor für die Dispersionskoeffizienten;  $\mu_w$  und  $\mu_s$  sind Konstanten zur Beschreibung Prozesse erster Ordnung in der flüssigen und festen Phase,  $\gamma_w$  und  $\gamma_s$  sind Parameter zur Beschreibung Prozesse 0. Ordnung in der flüssigen und festen Phase.  $\rho$  ist die Trockenrohddichte,  $S$  stellt den Senkenterm aus der Strömungsgleichung (1) dar und  $c_s$  ist die Konzentration des Senkenterms. Die Parameter zur Beschreibung von Prozessen 0. und 1. Ordnung können verwendet werden, um biologischen Abbau, radioaktiven Zerfall oder Verflüchtigung zu berücksichtigen.

Für die numerische Lösung der oben beschriebenen Gleichungen setzt das Programm die Finite-Elemente-Methode unter Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen ein. Es lassen sich mit SiWaPro DSS 2D horizontale, 2D vertikale und vertikalrotationssymmetrische Modelle aufbauen. Das Simulationsprogramm ermöglicht neben der stationären auch die instationäre Simulation auf Basis vorgegebener Randbedingungen (z.B. atmosphärische Randbedingungen) und berücksichtigt den Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln. Für eine einfache Bedienung des komplexen Simulationskerns wurde eine mehrsprachige grafische Benutzeroberfläche geschaffen, die den Nutzer durch einen Assistenten, einen implementierten Netzgenerator und die Anbindung bestehender Datenbanken zu Boden- und Stoffparametern bei der Dateneingabe sowie der anschließenden Ergebnisanalyse unterstützt.

## 6 Kopplung SIWAPRO DSS – VISUAL MODFLOW

Die Kopplung der Modelle erfolgt wiederum über die Modellgrenzen, wobei die von SiWaPro DSS berechneten Größen Grundwasserneubildung und Schadstoffkonzentration als instationäre obere Randbedingung in das Grundwassermodell eingehen. Eine Rückkopplung aus dem Grundwasserbereich in die ungesättigte Bodenzone ist zum gegenwärtigen Entwicklungsstand der NANOKAT Middleware noch nicht implementiert.

## **7 Simulation der Prozesse im Grundwasser**

Als Simulationsprogramm für die Grundwasserzone wird das kommerziell erhältliche Visual MODFLOW verwendet, welches auf den weit verbreiteten Programmen MODFLOW und MT3DMS basiert und dafür die grafische Benutzeroberfläche darstellt. Es unterstützt den Nutzer beim Modellaufbau und erstellt die MODFLOW Input-Dateien. Nach der Simulation können die Berechnungsergebnisse grafisch dargestellt und ausgewertet werden.

Visual MODFLOW verwendet zur numerischen Lösung der Feldgleichungen die Methode der Finiten-Differenzen. Die Ein- und Ausgabe wird über ASCII-Dateien gesteuert.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

Mit diesem gekoppelten Modell ist die Modellierung und Simulation der Strömungs- und Stofftransportprozesse in der ungesättigten Zone sowie dem Grundwasserbereich unter Berücksichtigung atmosphärischer Randbedingungen möglich.

Für eine vollständige Betrachtung des Wirkungspfad es Atmosphäre → Grundwasser ist jedoch zusätzlich die Kopplung eines Oberflächenwassermodells erforderlich. Dieses Modell wäre in der Lage, den Oberflächenabfluss zu bilanzieren, der sich beispielsweise aus Starkniederschlagsereignissen ergibt, die die Versickerungsleistung des Bodens übersteigen.

Um Starkniederschläge im Modell entsprechend abbilden zu können, ist eine Verbesserung der zeitlichen Auflösung der atmosphärischen Randbedingungen notwendig, je nach Anforderung bis auf 5 Minuten herunter. Die in taggenauer Auflösung vorliegenden Eingangsdaten müssen mit Hilfe statistischer Häufigkeitsverteilungen verfeinert werden, sodass Intensität und Häufigkeit zwar variabel, aber trotzdem bilanztreu gestaltet werden können. Dadurch ist eine Szenarienanalyse, beispielsweise hinsichtlich Klimawandel möglich.

## 9 Literatur

- [1] Blankenburg René, Gräber Peter-Wolfgang und Kemmesies Oliver  
*SiWaPro DSS - A Computer Aided Leachate Forecast Tool* [Report]: Proceedings/ConSoil.-  
Mailand: Umweltforschungszentrum Leipzig, 2008.
- [2] Nitsch Benjamin, Kemmesies Oliver und Gräber, Peter-Wolfgang  
*Groundwater recharge balancing under the conditions of climatic changes* [Report]: Pro-  
ceedings. - Jaipur, India: International Groundwater Conference, 2008.
- [3] Nitsch Benjamin, Kemmesies Oliver und Gräber Peter-Wolfgang  
*Grundwasserneubildungsberechnung unter den Rahmenbedingungen des Klimawandels* [Be-  
richt]:  
Proceedings. - Göttingen : FH-DGG Tagung, 2008.
- [4] Hoppe Bernd, Zillmer Axel und Gräber Peter-Wolfgang  
*Erstellung einer Wasserbilanz für die Wasserhaushaltsschicht der Deponie Köthen und der  
Nutzung der Daten für die Modellierung mit SiWaPro DSS* [Bericht]: Proceedings. - Leipzig :  
5. Deponiefachtagung, 2008.
- [5] Nitsch Benjamin, Gräber Peter-Wolfgang und Kemmesies Oliver  
*Anwendung synthetischer Niederschlagszeitreihen bei der Strömungsmodellierung in der un-  
gesättigten Bodenzone* [Buchabschnitt]/Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften/  
Buchverf. Wittmann Jochen und Müller Mike.- Berlin : Shaker-Verlag, 2007.
- [6] Herlitzius, Jobst  
*Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter forst- und landwirtschaftlich  
genutzten Flächen* [Diss.]: Hochschule für Technik und Wirtschaft und Technische Universi-  
tät Dresden, 2004
- [7] Richardson, C. W.  
*Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation*. Water  
Resources Research. 1981, Vol. 17, pp. 182-190, 1981
- [8] Kemmesies, Oliver  
*Prozessmodellierung und Parameteridentifikation von Mehrphasenströmungsprozessen in  
porösen Medien*. Dresden: Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., 1995. ISSN 1430-  
0176.

# Simulation of Freshwater Eutrophication: A Case Study for a River-Lake System

Albrecht Gnauck<sup>1</sup>, Bernhard Luther<sup>1</sup> and Wilfried Krug<sup>2</sup>

<sup>1</sup>e-mail: umweltinformatik@tu-cottbus.de

Brandenburg University of Technology at Cottbus

P.O.B. 10 13 44, D-03013 Cottbus, Germany

<sup>2</sup>wkrug@dualis-it.de

DUALIS GmbH IT Solution

Tiergartenstraße 32, 01219 Dresden, Germany

## Abstract

Anthropogenic pollutions and natural decay processes stimulate changes of water quality within freshwater ecosystems. These processes influence the functioning of freshwater ecosystems. The results of these processes are restricted water uses as well as high financial budgets for water treatment. A sustainable management of such freshwater ecosystems can be achieved by using simulation models. Therefore, a modelling and simulation framework was developed for a shallow river lake-system including phosphorus remobilisation from sediment. The simulation framework was carried out within the MATLAB environment while for parameter optimisation the software tool ISSOP was applied. Data are taken from the Lower Havel River. For water quality management two decision control strategies are discussed.

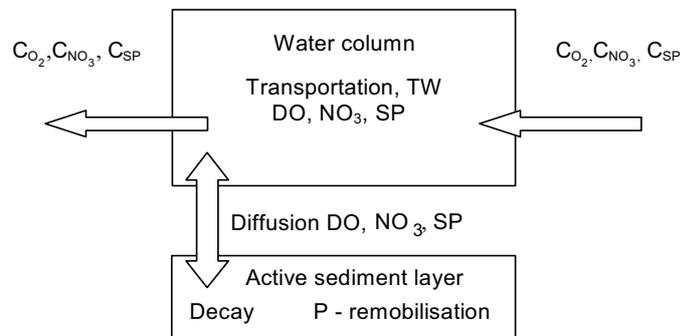
## 1 Introduction

The functioning of freshwater ecosystems and various water uses are affected by natural and man induced nutrient loads. While natural pollution is mostly small the nutrient input due to land erosion and intensive anthropogenic activities in river basins force the eutrophication processes. Eutrophication of freshwater bodies is characterised by an increase of dissolved nutrients in water bodies, mainly phosphorus, carbon and nitrogen, by excessive growth of green plants, and by restricted water uses due to anoxic water conditions as well as by odour problems, and it risks human health. The eutrophication process of freshwater ecosystems is supported by intensive man-made activities in river basins. Mostly, pollution will be more indicated by their effects but less by actual changes of matter concentrations. On the other hand, sediments have been accumulated nutrients over several decades [2]. They act as internal nutrient sources [1]. Some eutrophication models contain optimisation procedures [7]. To evaluate the algal dynamics due to nutrient influences of a lowland river-lake system a simulation framework was worked out within the MATLAB environment. For parameter optimi-

sation the ISSOP tool was combined with the simulator [5]. The modelling and simulation framework was applied to the catchment area of lowland rivers Havel and Spree close to the Berlin/Potsdam region. In this paper, simulation results are presented for important water quality indicators as phytoplankton biomass, phosphate phosphorus, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen. Different management options which are expressed by goal functions result in proposals of decision for water quality management.

## 2 Process identification

Within freshwater ecosystems the eutrophication process is stimulated by nutrient remobilisation from sediment supported by meteorological and hydrochemical conditions. Dead organic matter as algal biomass is mineralised by micro-organisms. This process needs electron acceptors which are supplied from the water column where nitrate and dissolved oxygen are the major electron acceptors before iron is consumed. The order of consumption is determined by Gibbs free energy gained in the reaction.. Methane formation due to decay of organic material in sediments leads to an increase of nitrogen and phosphorus within the pore water. Nutrients enter the sediment by molecular diffusion, convection, or bioturbation. In the case of aerobic conditions phosphate will be fixed in the sediment. Anaerobic conditions and formation of hydrogen sulphide cause a destruction of the iron(III)phosphate and iron(III)hydroxide layer of the mud-water interface which prevents phosphorus remobilisation under aerobic conditions. This process leads to a diffusion of phosphorus from pore water to the water column. The process model concept is shown in fig. 1.



**Figure 1:** Process model concept of P-remobilisation (SP–soluble phosphorus, DO–dissolved oxygen, NO<sub>3</sub>–nitrate nitrogen).

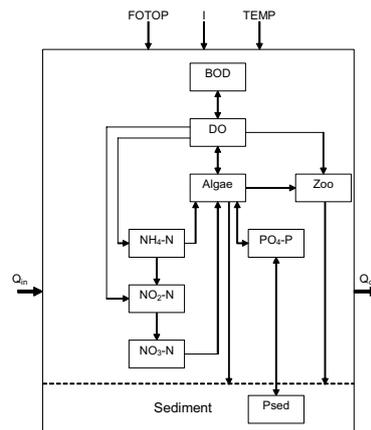
The respective sub-model equation is given by

$$\frac{dP_{SED}}{dt} = (-1)^{\Theta} \cdot \phi \cdot h_s \cdot (-D_{sp} / (1 - \ln(\phi^2))) \cdot (P - (P_{SED} / (h_s \cdot \phi))) / h_s / 2 + \Theta \cdot (c_{pcrit} - c_{pEA} / c_{pcrit}) \cdot (K_{Fe} \cdot C_{pFe} + qp)$$

where  $\Theta = 1$ , if  $CpEA \leq cpcrit$ , and  $\Theta = 0$ , if  $CpEA > cpcrit$ . The parameters are  $\phi$  – sediment porosity,  $hs$  - thickness of active sediment layer (m),  $Dsp$  – diffusion coefficient of dissolved phosphorus,  $P$  – dissolved phosphorus,  $CpFe$  – iron concentration in pore water,  $qp$  - ratio P/Fe of reducible iron,  $KFe$  – iron concentration in pore water with  $KFe = K1(TW)/36$ ,  $cpcrit$  – critical value of  $CpEA$ ,  $K1(TW) = K1(20)^{(0.1 \cdot \lg(2) / \lg(K120) \cdot (TEMP - 20) + 1)}$  – temperature dependent decay rate of organic material in pore water,  $K1(20)$  – standardised decay rate organic material in pore water at 20°C,  $CpO2$  – dissolved oxygen concentration in pore water with  $CpO2 = O2/31,998$ ,  $CpNO3$  – nitrate concentration in pore water with  $CpNO3 = NO3/14.007$ ,  $CpEA$  – electron acceptor concentration in pore water with  $CpEA = 2CpO2 + 5CpNO3$ . A detailed description of parameters is given by [3].

### 3 The eutrophication simulator

To simulate the eutrophication process in freshwater bodies a stationary 1D-model was developed. The model concept is presented in fig. 2.



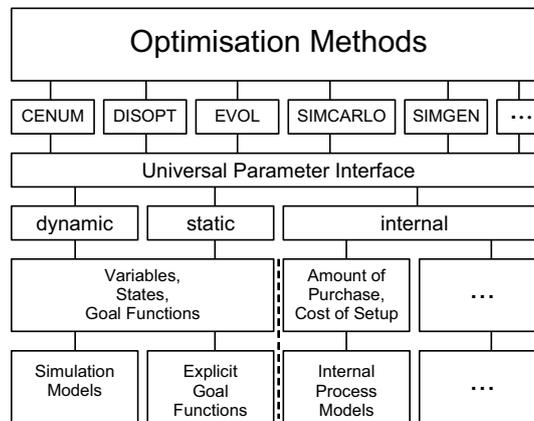
**Figure 2:** Conceptual model of the eutrophication simulator.

Model state variables are given by the water quality indicators phytoplankton (algae), zooplankton (zoo), orthophosphate phosphorus ( $PO_4$ -P), ammonia nitrogen ( $NH_4$ -N), nitrite nitrogen ( $NO_2$ -N), nitrate nitrogen ( $NO_3$ -N) as well as by dissolved oxygen (DO) and biochemical oxygen demand (BOD). To cover the phosphorus remobilisation process from sediment the submodel (Psed) given above was included in the phosphorus balance equation assuming that a quarter of soluble phosphorus is originated by P-remobilisation from sediment. Detailed descriptions of model equations, parameters, site constants and system specific parameters are described by [3].  $Q_{in}$  and  $Q_{out}$  describe the discharges into and out of the river segment or lake under consideration. External driving forces are photoperiod (FOTOP),

solar radiation (I) and water temperature (TEMP) [6]. The input to each river-lake segment is given by three input boundary conditions for dissolved oxygen, nitrate and soluble phosphorus.

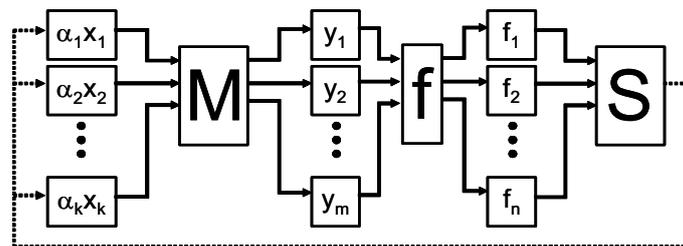
#### 4 The optimisation tool ISSOP

To support manufacturing, organisational and logistic processes a software tool for modelling and optimisation ISSOP (integrated system for simulation and optimisation) was developed by [5]. Figure 3 shows the ISSOP architecture.



**Figure 3:** The ISSOP optimisation architecture.

The following optimisation procedures are included: component wise enumeration, a quasi-gradient method, an evolutionary optimisation strategy, optimisation by MCM, optimisation by a genetic algorithm. Other optimisation procedures can be added.



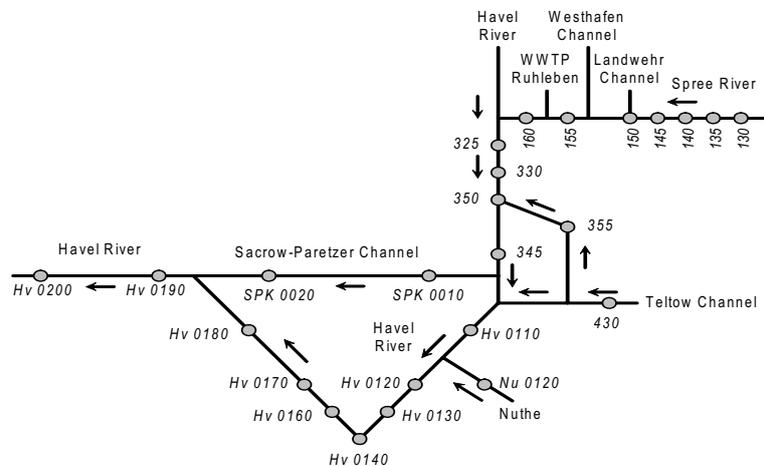
**Figure 4:** Coupling of *ISSOP* with the eutrophication simulator.

This tool was combined with the eutrophication simulator by using the implemented universal open MATLAB interface [4]. Input variables of the simulation system are denoted by  $\alpha_1x_1, \dots, \alpha_kx_k$ , outputs are symbolised by  $y_1, \dots, y_m$  respectively (fig. 4).

Goal functions are denoted by  $f_1, \dots, f_n$  with  $f_i(M(\alpha_1x_1, \dots, \alpha_kx_k)) = f_i(y_1, \dots, y_m)$  where  $i = 1, \dots, n$ , and arbitrary continuous functions can be used. They will be optimised simultaneously. If  $n > 1$ , the goal functions  $f_1, \dots, f_n$  are aggregated to a (weighted) sum  $S = \sum w_i f_i$  with  $\sum |w_i| = 1$ .  $w_i$  are weighting factors. ISSOP uses the model variables and target values as input data and gives optimised state variables back to the simulation system.

## 5 Experimental area

The River Havel belongs to the greatest tributaries on the right hand side of the River Elbe. It is strongly influenced by the River Spree. Rivers Spree and Havel are characterised by small elevation differences. The watershed is characterised by shallow lakes, wetlands and marshy country, as well as by high evaporation rates. Hydraulic works and banked-up water levels influence the water flow and the intensity and kinetics of nutrient dynamics along the course of the river. Only 25% of precipitation contributes to flow. For the water quality simulation framework the river stretches of interest were divided into 19 segments of different length (fig. 5). But the number of segments is not restricted.

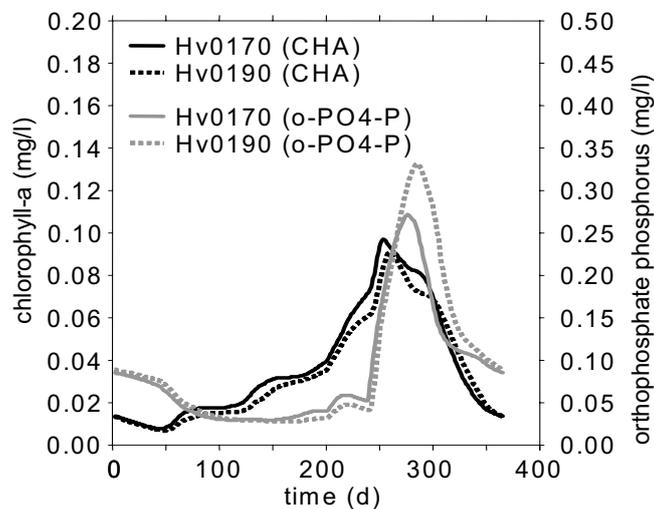


**Figure 5:** Segmentation of rivers Spree and Havel.

The model concept given above is valid for each river segment. Long-term administrative data sets from water authorities of the State of Berlin and the State of Brandenburg are used as input information. After validation procedures the eutrophication simulator was used to carry out basic simulations for the rivers Spree and Havel.

## 6 Results

In fig. 6 selected results of basic simulation runs are demonstrated. In accordance with natural observations phosphate phosphorus (grey lines) is decreased in spring due to consumption by diatoms. The increase in late summer is caused by phosphorus remobilisation from sediment. On the other hand, phytoplankton maxima in late summer/early fall are caused by cyanobacteria which utilise nitrogen as nutrient. These conditions lead to high growth rates of phytoplankton but also to high decay rates of dead organic material. Especially in late summer and fall anoxic conditions on sediment surface hold. From fig. 6 can be seen the same amount of soluble phosphorus as at the beginning of the year.



**Figure 6:** Basic simulation runs for phytoplankton and orthophosphate phosphorus.

The yearly phosphorus dynamics is determined by two different processes: A decrease of phosphate phosphorus due to phytoplankton uptake by diatoms in spring, and an extremely increase due to phosphorus remobilisation from sediment in fall. Because of nutrient rich water body the bioproduction in spring and late summer is high. During the first months of a year the growth of diatoms can be seen while in late summer green algae and cyanobacteria dominate. In late summer and fall algal blooms collapse and lead to anoxic conditions at the sediment-water interface due to high decay rates of dead organic matter accompanied by high rates of oxygen consumption.

Management options will then be obtained by scenario analyses with changing parameter values. Two control strategies are taken into consideration. The first one is based on the limiting nutrient concept of algal biomass. The second one refers to target values of German

Working Group LAWA regulations. Input variables of the simulator are denoted by  $x_1$  (phytoplankton biomass),  $x_2$  (orthophosphate phosphorus) and  $x_3$  (nitrate nitrogen), output variables  $y_1$ ,  $y_2$ , and  $y_3$  respectively. To get optimised results for the model transfer function  $M(\alpha_1 x_1, \alpha_2 x_2, \alpha_3 x_3) = (y_1, y_2, y_3)$  the following goal functions are considered:

1. Phytoplankton biomass  $f_1(t) = \sum_x \sum_t y_1(x, t) \rightarrow \min.$
2. Orthophosphate phosphorus  $f_2(t) = \sum_x \sum_t y_2(x, t) \rightarrow \max.$
3. Nitrate nitrogen  $f_3(t) = \sum_x \sum_t y_3(x, t) \rightarrow \max.$

Corresponding to the input variables following restrictions are valid for the parameters  $\alpha_i$  ( $i = 1, \dots, 3$ ):  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$  vary in the interval  $[0, 1]$ .

Weights according to the limiting nutrient concept:  $w_1 = 90.5$ ,  $w_2 = -1.1$  and  $w_3 = -8.4$ : An eutrophication control according to the limiting nutrient concept leads to a diminished phytoplankton maximum in late summer due to optimised nitrate concentrations. No effect of optimised orthophosphate phosphorus concentration can be stated.

Weights according to LAWA:  $w_1 = 42$ ,  $w_2 = -57$  and  $w_3 = -1$  with results  $\alpha_2 = 0.03$  and  $\alpha_3 = 0.91$ . Eutrophication control according to LAWA target values leads to nearly the same behaviour of phytoplankton biomass in spring but to smaller differences of phytoplankton maxima and to low nutrient concentrations in late summer. In consequence, the LAWA strategy leads to significant lower nutrient concentrations but to a slight increase of phytoplankton biomass. In opposite of that eutrophication control by means of limiting nutrient concept results in lower phytoplankton concentrations but higher admissible nutrient inputs.

## 7 Conclusions

The use of combined simulation-optimisation procedures to manage the water quality of rivers, lakes and reservoirs is an approach promising more theoretical understanding of complicated natural processes and software engineering methods. Direct interrelations exist not only between trophic layers, but also between different ecosystem components. The different model approaches are constrained by the amount and the type of available data. Perspectives of developments of simulation frameworks for water quality management on a river basin scale may be seen in combinations of water quality simulation models, multi-objective optimisation procedures and visualisation tools. The use of such a framework promises more theoretical understanding of complicated natural and management processes.

## 8 References

- [1] *DiToro, D. M.*: Sediment Flux Modelling. Wiley, Chichester, 2000.
- [2] *Goltermann, H. L.*: The Chemistry of Phosphate and Nitrogen Compounds in Sediments. Kluwer, Dordrecht, 2004.
- [3] *Gnauck A., Heinrich, R. and B. Luther*: Water Quality Management of a Sub-Watershed of the Elbe River. In: Pillmann, W. and K. Tochtermann (eds.): Environmental Commu-

nication in the Information Society. Internat. Soc. Environm. Protect., Vienna, 2002, pp. 524-531.

- [4] *Gnauck, A., Luther, B., Wiedemann, T and W. Krug*: Coupling of Simulators for Optimal Control of Water Quality. In: Gnauck, A. and R. Heinrich (eds.): *The Information Society and Enlargement of the European Union*. Metropolis, Marburg, pp. 373-380, 2003.
- [5] *Krug, W.*: *Modelling, Simulation and Optimisation for Manufacturing, Organisational and Logistical Processes*. SCS Europe Publishing House, Delft, 2002.
- [6] *Straškraba, M. and A. Gnauck*: *Freshwater Ecosystems – Modelling and Simulation*. Elsevier, Amsterdam, 1985.
- [7] *Wierzbicki, A. P., M. Makowski and J. Wessels (eds.)*: *Model-Based Decision Support Methodology with Environmental Applications*. Kluwer, Dordrecht, 2000.

# Parameter Optimisation of an Eutrophication Simulation Model

Bernhard Luther, Albrecht Gnauck and Wilfried Krug  
luther@tu-cottbus.de, albrecht.gnauck@tu-cottbus.de  
Brandenburg University of Technology at Cottbus,  
Dept. of Ecosystems and Environmental Informatics  
Konrad-Wachsmann-Allee 1, 03046 Cottbus, Germany  
wkrug@dualis-it.de

DUALIS GmbH IT Solution, Tiergartenstraße 32, 01219 Dresden, Germany

## 1 Introduction

The various definitions of the collective term eutrophication are covering numerous processes and descriptions. Comparing these definitions a set of cardinal symptoms can be outlined that touch the ecological state of waters according to certain unified categories. In the water framework directive [7] a catalogue of indicators is defined in order to characterise

- (i) the biological
- (ii) the physicochemical and
- (iii) the hydromorphological

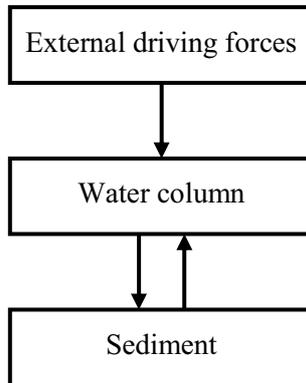
state of a water. An additional fourth group of symptoms is given with

- (iv) normative criteria of water use.

Principally the criteria of the categories (i) – (iii) affect the state (description) of an ecosystem while category (iv) refers to the state evaluation. In conformity with the literature the eutrophication process generally contains an increased growth and respiration of the algae biomass (i) and a stimulation of the nutrient cycles (ii) including the intensification of the nutrient transport between sediment and water column. For example Schnoor [5] names excessive plant growth (i), the loss of species diversity (i) and the hypolimnetic loss of dissolved oxygen (ii) as typical symptoms and adds taste and odor problems (iv).

The cardinal symptoms of eutrophication lead to a simple basic structure of a eutrophication model with restricted generality. The nutrient cycles inside of the water column are in interaction with the sediment and beside sea-internal interactions (for example ammonification of organic nitrogen) they are influenced by external driving forces (for example global radiation).

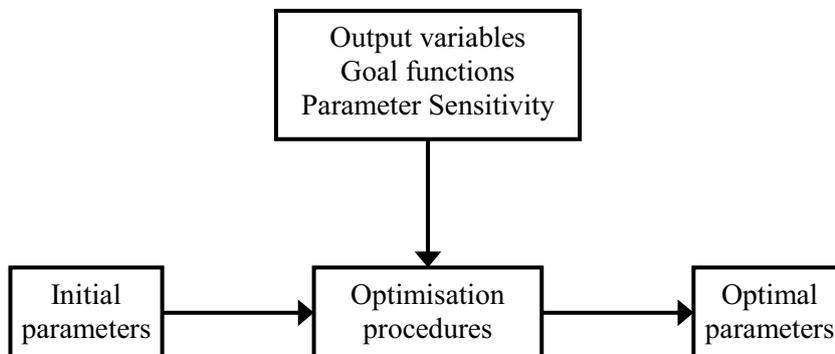
Figure 1 shows this basic structure and the HavelMod simulator [2] is a realisation for the special case of lakes and reservoirs. It is considered in another paper of this book. Here the conditions for optimal parameter settings are pointed out.



**Figure 1:** Basic structure of an eutrophication model.

## 2 Parameter Optimisation and Sensitivity

The problem of parameter optimisation can be described related to a models quality and accuracy. Under the prerequisite of well-founded initial parameter settings a higher accuracy can be reached with the help of iterative optimisation. The optimisation procedures refer to goal functions including the output variables of the model. The parameter sensitivity according to the output variables gives information how to select and weight the parameters and on which range and accuracy they have to be treated (figure 2).



**Figure 2:** From initial parameter settings to optimal parameter settings.

An iterative optimisation using different methods is realised using a coupled software tool, ISSOP [3], that enables the user to apply and develop suitable simulation models independently. Especially the role of parameter sensitivity is discussed in the context of setting up a suitable quality function [4].

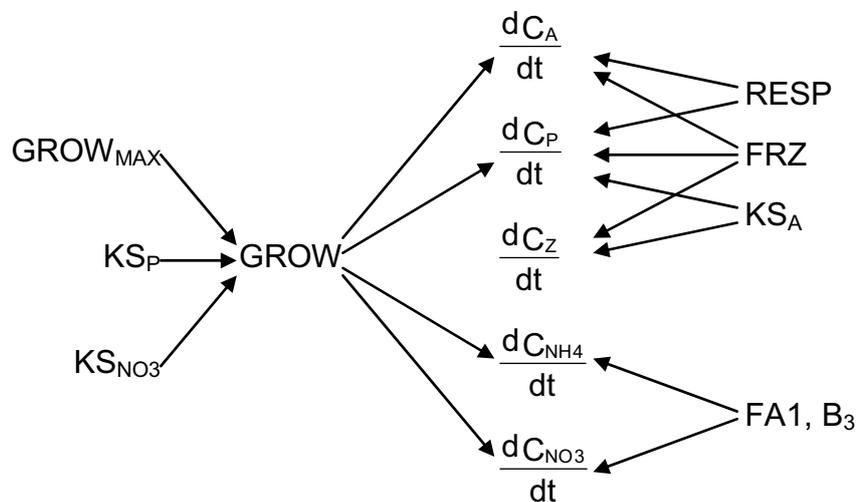
Three different approaches can be taken [6]:

- A first estimate is obtainable from laboratory and field observations of eutrophication processes and effects by means of statistical analysis.
- The first problem of parameter optimisation is the determination of a proper goal function according to which the difference between observed and model predicted values is minimised. A second problem is the finding of a global minimum, local minima being encountered during search. Another problem is that for ecological models often several parameter combinations are similarly optimal. But, for determining the most appropriate combination exists no objective way.
- Estimates of model parameter importance may be obtained by sensitivity analysis according to major parameter changes  $\Delta p$ .

Another approach is the analytical sensitivity analysis where sensitivity functions are represented by partial derivatives of state variables  $u_j$  to parameters:  $S(p_i) = \partial u_j / \partial p_i$ . This differential method of sensitivity analysis is based on linearisation around the nominal solution by numerical or graphical procedures. This procedure is not covered within this paper.

### 3 Application

Concerning the eutrophication process in figure 3 an overview is presented on direct relationships of important model parameters to model variables. The parameters themselves can be assigned to essential processes in the water body and in the sediment.



**Figure 3:** Direct and indirect relations between model parameters and model variables.

The overall growth rate of phytoplankton mainly is determined by the production of algae biomass and the half saturation constants  $K_{SP}$  (of phosphorus) and  $K_{SN03}$  (of nitrate). It is restricted by an upper bound  $GROW_{MAX}$  for the nutrient uptake of the phyto-

plankton. So the constants  $GROW_{MAX}$ ,  $KS_P$  and  $KS_{NO_3}$  directly affect the phytoplankton concentration and the concentration of the nutrients nitrogen and phosphorus. The nitrogen fraction of algae biomass  $FA1$  and the ammonification rate  $B_3$  directly affect the nitrogen compounds ammonium and nitrate. The half saturation constant  $KS_A$  in the balance equation of zooplankton affect zooplankton and phosphorus. The filtration rate  $FRZ$  of zooplankton has a direct influence on zooplankton only, and the respiration rate  $RESP$  of phytoplankton connects phytoplankton and phosphorus.

For this eight parameters  $GROW_{MAX}$ ,  $KS_P$ ,  $KS_{NO_3}$ ,  $KS_A$ ,  $FRZ$ ,  $FA1$ ,  $B_3$  and  $RESP$  initial values ( $p^*$ ) are given (table 1). On the base of this values any parameter  $p$  has been varied in the interval  $\Delta p$ .

**Table 1:** Reference values and ranges of the eight parameters.

Parameter $p$	reference value $p^*$	Lower bound $p_{lower} = 10\% \cdot p^*$	Upper bound $p_{upper} = 200\% \cdot p^*$
GROWMAX	5	0.5	10
KSP	30	3	60
KSNO3	0.1	0.01	0.2
KSA	0.06	0.006	0.12
FRZ	0.1	0.01	0.2
FA1	50	5	100
B3	0.02	0.002	0.04
RESP	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-5}$

Any model variable leads to a different sensitivity ranking. In order to summarise rankings of multiple variables partial ordering is a way of focussing on the ordinal relationships. Partial orders and Hasse diagrams are well-known formal tools in environmental sciences and chemistry [1]. Figure 3 summarises the global absolute difference

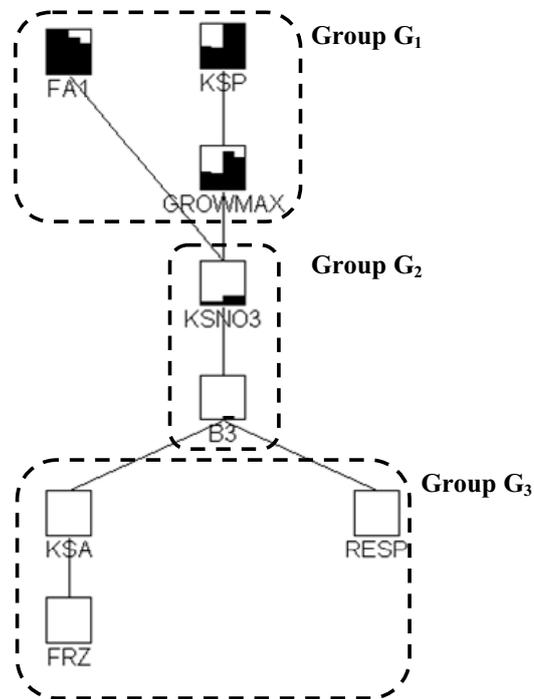
$$\tilde{\Delta} x = \max_{p,t} |\Delta x| = \max_{p,t} |\Delta x_p(t)| = \max_{p,t} |x_p(t) - x_{p^*}(t)|$$

of the four variables  $x = CHA$ ,  $o-PO_4-P$ ,  $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$  according to the eight parameters  $GROW_{MAX}$ ,  $KS_P$ ,  $KS_{NO_3}$ ,  $KS_A$ ,  $FRZ$ ,  $FA1$ ,  $B_3$  and  $RESP$  in a Hasse diagram.

It is noticeable that the four parameters  $GROW_{MAX}$ ,  $FA1$ ,  $KS_P$ , and  $KS_{NO_3}$  that directly affect the algae growth form the upper half of *all* rankings. The lower half is formed by the filtration rate of zooplankton, the respiration rate of phytoplankton and the parameters  $B_3$  (ammonification rate) and  $KS_A$  (half saturation constant in the balance equation of zooplankton). The two latter mentioned can be seen as parameters of sea-internal driving forces.

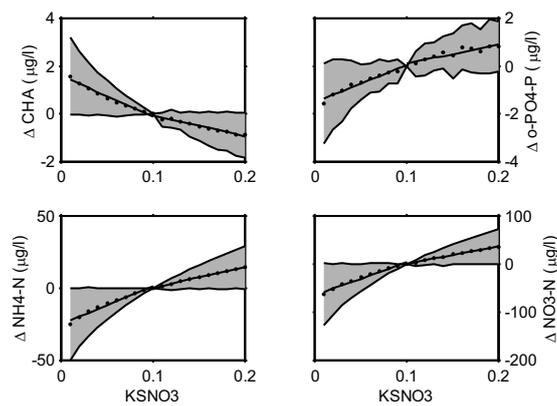
More precisely all of the four variables show a partition of the parameter set into three groups:

- Group  $G_1 = \{ GROW_{MAX}, FA1, KS_P \}$       highest sensitivity
- Group  $G_2 = \{ KS_{NO_3}, B_3 \}$       mean sensitivity
- Group  $G_3 = \{ KS_A, FRZ, RESP \}$       lowest sensitivity

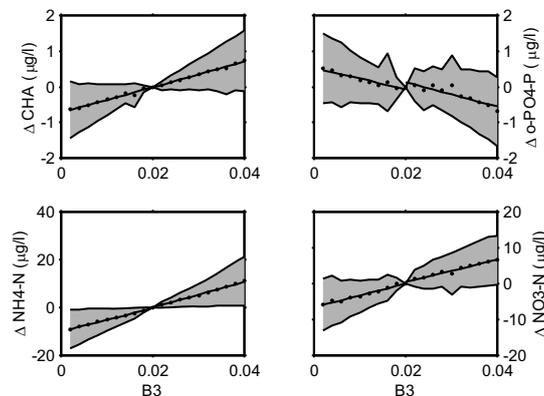


**Figure 3:** Hasse diagram the global absolute difference  $\tilde{\Delta}_x$  of the four variables  $x = \text{CHA}, \text{o-PO}_4\text{-P}, \text{NH}_4\text{-N}, \text{NO}_3\text{-N}$  according to eight parameters.

Figure 4 shows the sensitivity of the variables CHA, o-PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N according to parameter KS<sub>NO3</sub>, figure 5 shows the results for parameter B<sub>3</sub>.



**Figure 4:** Sensitivity of the variables CHA, o-PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N to KS<sub>NO3</sub>.



**Figure 5:** Sensitivity of the variables CHA, o-PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N to B<sub>3</sub> .

The output of the eutrophication simulator investigated is most sensitive for parameters characterising phytoplankton growth and dynamics. A second level of sensitivity is given by parameters describing nutrient cycles within the water body. In opposite of that, the influence of zooplankton to phytoplankton was found very stiff.

## 4 References

- [1] *Brüggemann, R. and Carlsen, L.*: Partial Order in Environmental Sciences and Chemistry. Springer, Berlin, 2006.
- [2] *Gnauck A., Heinrich, R. and B. Luther*: Water Quality Management of a Sub-Watershed of the Elbe River. In: Pillmann, W. and K. Tochtermann (eds.): Environmental Communication in the Information Society. Internat. Soc. Environm. Protect., Vienna, 2002, pp. 524-531.
- [3] *Krug, W.*: Modelling, Simulation and Optimisation for Manufacturing, Organisational and Logistical Processes. Delft: SCS Europe Publishing House, 2002.
- [4] *Luther, B, Gnauck, A.*: Parameter Sensitivity of an Eutrophication Model. In: Wittman, J., Flechsig, M. (Ed.) 2009: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Potsdam 2009. Aachen: Shaker, 125-133.
- [5] *Schnoor, J. L.*: Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil: Fate and Transport of Pollutants in Water, Soil and Air. Wiley & Sons. New York, 1996.
- [6] *Straškraba, M. and Gnauck, A.*: Freshwater Ecosystems – Modelling and Simulation. Amsterdam: Elsevier, 1985.
- [7] *WFD*: Water framework directive, directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities L 327/1 from 22th of December 2000.

# **Ermittlung möglicher Überflutungsflächen in Ho Chi Minh City durch einfache Simulation**

Nguyen Xuan Thinh<sup>1</sup>, Anne Bräuer<sup>1</sup>, Verena Teucher<sup>1</sup> und Harry Storch<sup>2</sup>  
Ng.thinh@ioer.de; a.braeuer@ioer.de; teucher@mail.ioer.de; storch@tu-cottbus.de

<sup>1</sup> Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung  
Weberplatz 1, 01217, Dresden

<sup>2</sup> BTU Cottbus, Lehrstuhl Umweltplanung

## **Kurzfassung**

In den letzten Jahren hat Ho Chi Minh City (HCMC) extrem unter Überflutungen gelitten, welche durch Gezeiten und/oder Regen verursacht wurden, auch durch ungewöhnlich heftige Regenfälle in der Trockenzeit. In diesem Beitrag beschreiben wir die Ermittlung möglicher Überflutungsflächen in HCMC durch eine einfache Simulation unter Verwendung eines Digitalen Höhenmodells und weiterer Annahmen. Die Arbeit stellt Zwischenergebnisse des Arbeitspaketes „WP Urban Flooding“ im Rahmen von „BMBF Megacity Research Project TP. Ho Chi Minh“ dar. Ziel des WP ist es, Konfliktbereiche bei unterschiedlichen Überflutungssituationen für HCMC zu ermitteln und Gefahrenkarten zu erstellen sowie mögliche Retentionsflächen zu identifizieren. Dies schließt die Entwicklung einer Geodatenbasis für das Monitoring und Management von Hochwasserereignissen ein.

## **1 Einleitung**

Wegen seiner topographischen Lage ist Vietnam durch den Klimawandel extrem gefährdet, was globale Ländervergleichsstudien zeigen (vgl. [1], [2], [3]). Besonders betroffen sind die Metropolen und Wirtschaftszentren des Landes – Hanoi und Ho Chi Minh City. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat innerhalb seines Förderprogrammes „Sustainable Development of the Megacities of Tomorrow“ das von der BTU Cottbus koordinierte Projekt „Megacity Research TP. Ho Chi Minh“ mit einer Laufzeit von fünf Jahren im Juli 2008 bewilligt. An diesem Projekt ist das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) durch die Bearbeitung von zwei Arbeitspaketen (Urban Flooding und Urban Energy) beteiligt.

Gegenwärtig leidet die Metropolregion HCMC oft unter Hochwasser mit neuen Formen von Überflutungen. Seit Anfang der 1990er Jahre nimmt die Häufigkeit der Hochwasserereignisse deutlich zu. Allein in den ersten vier Monaten von 2009 gab es in HCMC zwei große Überflutungen, die man bisher in der Trockenzeit selten erlebt hat. Nach starkem Regen am 07.03.2009 und am 13.04.2009 standen viele Straßen in HCMC unter Wasser, tausende Menschen saßen auf Motorrädern, in Autos und in Bussen im Wasser fest, das öffentliche Leben kam zum Stillstand ([4], [5]). Das IÖR wird gemeinsam mit der FU Berlin (Professur für Fernerkundung und Geoinformatik) Konfliktberei-

che bei unterschiedlichen Überflutungssituationen für das Untersuchungsgebiet HCMC ermitteln und daraus Gefahrenkarten ableiten.

## 2 Modellierung von Überflutungsflächen

Um die Überflutungsflächen in der Vergangenheit auf Basis der vorhandenen Datensätze zu verorten, führt das IÖR-Projektteam seit Anfang 2009 umfangreiche Geodatenverarbeitung und GIS-Analysen durch. Diese Arbeit ist aufgrund von Ungereimtheiten und schlechter Datenqualität sehr zeitaufwendig. Die vietnamesischen Experten und Partner Ho Long Phi (HCMC UT), Dr. Truong Van Hieu (SIHYMETE) und Le Thanh Hoa (USSH, Department of Geography) haben das IÖR-Team mit ihren Orts- und Fachkenntnissen entscheidend unterstützt. Besonders hervorzuheben ist die Umwandlung der digitalen Flächennutzungsdaten aus dem MicroStation-Format in ein ArcGIS-Format durch Le Thanh Hoa (USSH, Department of Geography).

Zunächst wurden die räumliche Verteilung von Überflutungsstandorten und die Häufigkeit der Hochwasserereignisse untersucht und kartografisch dargestellt.

Auf Basis der einzelnen Punktdatendateien von Ho Long Phi (HCMC UT) hat das IÖR-Projektteam ein Digitales Höhenmodell (DHM) für weitere Analysen in ArcGIS aufgebaut und mit den Flächennutzungsdaten überlagert. Die Geodatenanalyse liefert Grundlagen für die Erstellung einer Kartenserie über historische Überflutungen und hochwassergefährdete Flächen in HCMC.

In einem ersten Arbeitsschritt wurden besonders hochwassergefährdete, tief liegende Gebiete untersucht. Die Analysen wurden für verschiedene angenommene Überflutungshöhen (0,5m, 1,0m und 1,5m über dem Meeresspiegel) durchgeführt. Durch Verschneiden des Digitalen Höhenmodells mit den Daten der Landnutzung konnten zunächst Anteile der betroffenen Landnutzungsarten ermittelt werden. Nach Angaben des vietnamesischen Experten Ho Long Phi (HCMC UT) sollte vor allem eine Fluthöhe von 1,5m über dem Meeresspiegel besonders betrachtet werden.

Bild 1 stellt die Flächen dar, welche bei einem Wasserstand von 1,5m über dem Meeresspiegel gefährdet wären. Diese einfache Simulation wird im weiteren Arbeitsverlauf untersetzt, indem unter Annahme verschiedener Anstiege des Meeresspiegels die unterschiedlichen Überflutungsflächen ausgewiesen werden. Tabelle 1 zeigt für zusammengefasste Landnutzungsarten die bei bestimmten angenommenen Wasserständen betroffenen Flächen in km<sup>2</sup>.

Ein nächster Arbeitsschritt ist die Ermittlung historischer Überflutungsgrenzen. Dazu sollen einfache Simulationen zur Bestimmung möglicher Überflutungsflächen durchgeführt werden. Hindernisse wie beispielsweise Gebäude, die die Wasserausbreitung einschränken, finden zu diesem Zeitpunkt der Arbeiten noch keine Berücksichtigung in den Modellierungen. Es wird also angenommen, dass sich das Wasser unendlich weit ausbreiten kann. Diese Simulation wird in enger Kooperation mit vietnamesischen Partnern und auf Anregung vietnamesischer Experten, maßgeblich Ho Long Phi (Experte für Wassermodellierung, Wasserversorgung und Stadtentwässerung), durchgeführt. Dem IÖR liegen Daten zur Überflutung durch Gezeiten für verschiedene Straßenzüge in Tabellenform vor.



Als erster Schritt zur Bestimmung der historischen Hochwassergrenzen wurden diese Daten ausgewertet. Da alle Angaben nur auf Vietnamesisch vorlagen waren zunächst umfangreiche Übersetzungen notwendig.

**Tabelle 1:** Gefährdete Flächen bei unterschiedlichen angenommenen Wasserständen über dem Meeresspiegel. (\* Anteil an der Gesamtfläche von Ho Chi Minh City)

Landnutzung	Gefährdete Flächen bei einem Wasserstand über dem Meeresspiegel von					
	0,5m		1,0m		1,5m	
	[km <sup>2</sup> ]	Anteil*	[km <sup>2</sup> ]	Anteil*	[km <sup>2</sup> ]	Anteil*
Siedlungsgebiet	20,3	1,0%	76,5	3,8%	140,7	7,0%
Landwirtschaftlich genutzte Fläche	117,6	5,9%	349,0	17,4%	433,3	21,6%
Anderer Freiraum	33,2	1,7%	237,5	11,9%	477,5	23,8%
Gewässerflächen	1,3	0,1%	6,3	0,3%	10,8	0,5%
<b>Gesamt</b>	<b>172,5</b>	<b>8,6%</b>	<b>669,3</b>	<b>33,4%</b>	<b>1062,3</b>	<b>53,0%</b>

Zu 75 Straßenabschnitten werden die Anzahl der Hochwasserereignisse sowie die maximale Überflutungshöhe (im Folgenden Wasserstandshöhe, d.h. Höhe des Wasserpegels über der Straßenoberfläche) ausgewiesen. Es wird für nahezu alle Messpunkte angegeben, zwischen welchen Nebenstraßen und mit welcher Wasserstandshöhe eine Straße überflutet war. Die Messungen stammen alle aus dem Jahr 2008. Ziel der Simulation ist es, diese Messwerte anhand der Straßennamen mit den Straßengeometrien in einem GIS zu verknüpfen und mit Hilfe des Digitalen Höhenmodells die möglichen Überflutungsflächen zu ermitteln.

In der Simulation werden vereinfachend die Mittelpunkte der Straßenabschnitte verwendet. Dazu mussten zunächst die Mittelpunkte der Straßenabschnitte extrahiert werden. Die Straßen liegen in Form von Polygonen vor. Nachteil des Datensatzes ist, dass die Polygone mehrere Straßenabschnitte umfassen bzw. auch Nebenstraßen beinhalten. Die Erzeugung von Straßenabschnitten erschien am besten umsetzbar, indem die Mittellinien der Polygone erzeugt werden. Durch die Schnittpunkte der Mittellinien ergeben sich die Straßenabschnitte automatisch. Der Einsatz herkömmlicher GIS-Techniken (Befehl Centerline, Einsatz von Filtern) führte nicht zum gewünschten Ergebnis.

Um die erforderlichen Straßenabschnitte zu ermitteln, wurde deshalb die Bildverarbeitungssoftware HALCON eingesetzt. Mit Hilfe des implementierten Operators „skeleton“ konnten die Eingangsdaten hinreichend präzise skelettiert und auf diese Weise Mittellinien der Straßengeometrien erzeugt werden. Da der Operator nur auf Rasterdaten anwendbar ist, wurden die Straßengeometrien von Ho Chi Minh Stadt in einem Vorverarbeitungsschritt in ein binäres Bild (TIFF) konvertiert. Der Export der Geometriedaten (Koordinaten) der erzeugten Skelettlinien erfolgte im ArcGIS-kompatiblen ASCII-

Format. Aufgrund der Größenlimitationen beim Rasterdatenimport in HALCON wurden in ersten Untersuchungen zunächst die Straßen des Zentrums von Ho Chi Minh Stadt analysiert. Die Konzentration auf das Stadtzentrum stellt zwar eine Einschränkung in Bezug auf die Beurteilung der Überflutungssituation für die Gesamtstadt dar, jedoch verdient dieses Gebiet erhöhte Aufmerksamkeit, da in diesem Bereich am häufigsten Überflutungen auftreten. Weiterhin sind im Zentrum die größten Schäden durch Überschwemmungen zu erwarten, da hier Handel, Banken und Geschäftszentren angesiedelt sind.

Aus den so erzeugten Straßenabschnitten wurden die Mittelpunkte generiert. Für diese Punkte wurden die Straßennamen übernommen und über die Namen die Wasserstandshöhe der Überschwemmung den entsprechenden Abschnitten zugeordnet. Ein Problem stellte dabei die Tatsache dar, dass nicht alle Messwerte an die Geometrien übertragen werden konnten. Nicht alle Straßen, zu denen Messwerte vorlagen, waren in den Geometrien enthalten und konnten auch mit Hilfe anderer Quellen (Stadtplan, Google Maps) nicht ermittelt werden. Ein weiteres Problem bei der Zuordnung ist die Namensgebung der Straßen in Ho Chi Minh Stadt. Viele kleine Nebenstraßen oder Gassen tragen den Namen der Hauptstraße und sind somit nicht eindeutig identifizierbar bzw. sind nur mit Nummern gekennzeichnet, die nicht in Stadtplänen verzeichnet sind. Insgesamt konnten von den 75 Messwerten nur 43 verortet werden.

Für die Mittelpunkte der Straßenabschnitte wurde aus dem Digitalen Höhenmodell die Höhe über dem Meeresspiegel extrahiert. Anschließend wurden die Höhe des Wasserstands bei Überflutung und die Geländehöhe über dem Meeresspiegel für jeden Punkt aufsummiert, um so die Höhe des Wasserspiegels über dem Meeresspiegel für die Überflutung (Überflutungshöhe über dem mittleren Meeresspiegel) zu erhalten. Aus diesen Werten wurden sowohl der Minimalwert, der Maximalwert und der Mittelwert verwendet, um mögliche Überflutungsflächen zu ermitteln. Dazu wurde eine Flutung des DHM von Ho Chi Minh Stadt simuliert, indem das DHM nacheinander anhand dieser drei Werte in einen Bereich über- und unterhalb dieser Marken reklassifiziert wurde. Alle Flächen unterhalb dieser Höhenwerte werden als überflutete Flächen angenommen.

Da die Messwerte räumlich sehr weit auseinanderlagen konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Für einzelne Messpunkte wurden sehr hohe Überflutungshöhen über dem Meeresspiegel ermittelt. Da in dieser vorerst sehr einfachen Simulation keine Hindernisse wie Gebäude etc. Berücksichtigung finden, werden anhand dieser Methode unwahrscheinlich große Überflutungsflächen ermittelt. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Simulation auf räumlich begrenzte Bereiche einzuengen und lokal zu analysieren. Im Folgenden sollen die Ergebnisse für einen Cluster von Messpunkten in Quận 1, dem ältesten und zugleich zentralen Teil von Ho Chi Minh Stadt, aufgezeigt werden:

Für den Cluster von acht Messpunkten in Quận 1 wurden ebenfalls Maximalwert, Minimalwert und Mittelwert der Überflutungshöhen über dem Meeresspiegel ermittelt und zur Reklassifizierung des DHM verwendet (Tabelle 2). Auf diese Weise wurden die minimal, die maximal möglichen sowie die im Mittel überfluteten Flächen ermittelt. Weiterhin wurden sämtliche Straßen, zu denen Messungen vorlagen sowie deren 15m-Umgebung als überflutet angesehen und als solche mit berücksichtigt. Die Distanz von 15m wurde gewählt, da bei einer überfluteten Straße auch die angrenzenden Häuser be-

troffen sind. Aufgrund der Bauweise der Häuser in Ho Chi Minh Stadt erscheint eine Breite von 15m als angemessen, da die sogenannten "Shophouses" oder „Tube-Houses" von der Straße weit in die Baublöcke hineinreichen.

**Tabelle 2:** Ausschnitt Quận 1 – Maximum, Minimum und Mittelwert der Überflutungshöhen.

	Messpunkt	Höhe über dem Meeresspiegel (DHM) [m]	Wasserstands-höhe [m]	Überflutungshöhe über dem Meeresspiegel [m]
Minimalwert	Duong Co Bac	1,44	0,15	1,59
Mittelwert	-	-	-	1,78
Maximalwert	Duong Yersin	1,71	0,20	1,91

Die für Quận 1 ermittelten maximalen und mittleren möglichen überfluteten Flächen werden in Bild 2 und 3 dargestellt.

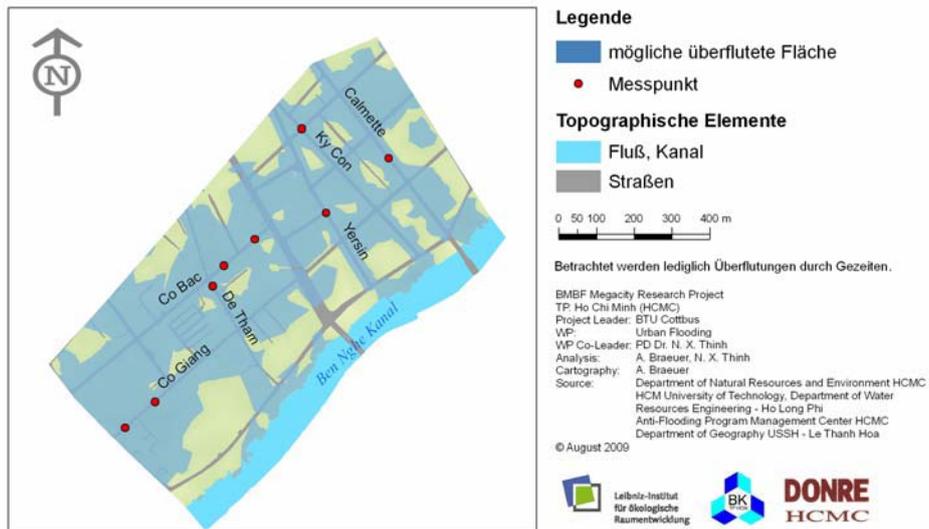
Für das betrachtete Gebiet in Quận 1 wurden die überfluteten Flächen und deren Anteil am Untersuchungsgebiet bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3:** Ausschnitt Quận 1 – Mögliche Überflutungsflächen unter Verwendung des Maximums, des Minimums und des Mittelwertes der Messwerte.

	Überflutete Fläche [ha]	Anteil am Untersuchungsgebiet
Minimum	21,1	31,7%
Mittelwert	46,5	69,7%
Maximum	59,3	89,0%

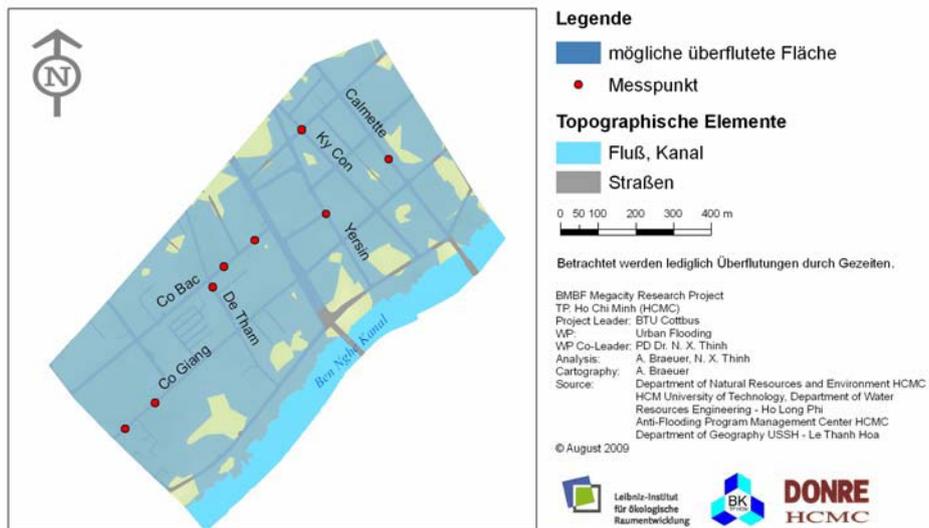
Von den Ergebnissen wird die Simulation der möglichen Überflutungsflächen anhand der mittleren Überflutungshöhen als realistischste betrachtet. Die hier als mögliche Überflutungsflächen dargestellten Flächen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit mindestens einmal im Jahr 2008 überschwemmt gewesen. Unter Umständen sind auch weitere Flächen überschwemmt worden, da ja auch Werte oberhalb des Mittelwertes gemessen wurden. Die Simulation anhand der Maximalwerte wird vermutlich nur bei extremen Hochwassersituationen erreicht. Die Verwendung des Minimalwertes führt zu möglichen Überflutungsflächen, die sehr wahrscheinlich von den meisten Hochwasserereignissen übertroffen werden, und demzufolge keine ausreichende Ausweisung von Risikoflächen darstellt.

**Mögliche Überflutungsflächen in Ho Chi Minh City 2008, Ausschnitt Quận 1 - Bestimmung anhand der mittleren Überflutungshöhe**



**Bild 2:** Mögliche überflutete Flächen – Bestimmung anhand der mittleren Überflutungshöhen.

**Mögliche Überflutungsflächen in Ho Chi Minh City 2008, Ausschnitt Quận 1 - Bestimmung anhand der maximalen Überflutungshöhe**



**Bild 3:** Mögliche überflutete Flächen – Bestimmung anhand der maximalen Überflutungshöhen.

Als weiterführende Arbeitsschritte ist geplant, Hindernisse die das Ausbreiten der Wassermassen beeinträchtigen, wie z.B. Gebäude oder erhöht gebaute Straßen mit Deichwirkung, in der Simulation zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wird im IÖR bereits ein Gebäudedatensatz aufbereitet.

Weiterhin müssen die topographischen Gegebenheiten von Ho Chi Minh City stärker in die Modellierungen einfließen. So ist z.B. im Relief von Ho Chi Minh City ein Nord-Süd-Gefälle festzustellen, welches eine Ausbreitung von Hochwasser Richtung Norden hemmt.

Weiterhin ist geplant, die Ausbreitung des Wassers innerhalb vorher festgelegter Radien zu analysieren, um innerhalb dieser Radien gezielt nach Ausbreitungshindernissen suchen zu können.

### **3 Danksagung**

Dieses Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Weiterhin bedanken wir uns für die wertvollen Unterstützungen von Nguyen Thi Cam Van (DoNRE HCMC), Ho Long Phi (HCMC UT), Dr. Truong Van Hieu (SIHYMETE) und Le Thanh Hoa (USSH HCMC). Ein besonderer Dank gilt Hendrik Herold vom IÖR, der die Skelettierung der Straßen von Ho Chi Minh City für uns durchgeführt hat.

### **4 Literatur**

- [1] *Brandenburg University of Technology Cottbus (BTU):* Adaptation Planning Framework to Climate Change for Urban Environment and Development in Ho Chi Minh City. BMBF Research Proposal. 2007.
- [2] *Eckert, R.; Waibel, M.:* Climate Change and Challenges for the Urban Development of Ho Chi Minh City / Vietnam. Pacific News Nr. 31 (2009).
- [3] *Storch, H.; Schmidt, M.:* Adaptation Planning Framework to Climate Change for the Urban Environment in Ho Chi Minh City. In: Möller, A.; Page, B.; Schreiber, M. (Eds.): Environmental Informatics and Industrial Ecology, EnviroInfo 2008. 22nd International Conference on Informatics for Environmental Protection, Leuphana University Lueneburg, Germany. Aachen: Shaker, 2008, pp. 623-630, 2008.
- [4] *VNExpress:* Online-Zeitung vom 07.03.2009. [www.vnexpress.net](http://www.vnexpress.net).
- [5] *VNExpress:* Online-Zeitung vom 13.04.2009. [www.vnexpress.net](http://www.vnexpress.net).

# **The Urban Structure Type Approach as a dynamic analysis and planning module for urban scale climate change and development scenarios**

Nigel DOWNES, Kiduk MOON, Hendrik RUJNER & Harry STORCH

moonkidu@tu-cottbus.de  
downes@tu-cottbus.de  
rujnehen@tu-cottbus.de  
storch@tu-cottbus.de

Brandenburg University of Technology Cottbus,  
Department of Environmental Planning  
POB 101344, 03013 Cottbus

## **Short Summary**

To adapt the future urban model to the climate consequences on the future, a common understanding of both environmental planning and town planning is necessary. Therefore an 'urban typology' concept, already developed in Europe in the 1980s will be modified as a practicable method to structure the spatial order sensitivity analyses of settlement areas in Ho Chi Minh City, Vietnam. The aim of this work is to identify urban structure types in highly dense development areas which are extremely vulnerable to climate change. The classification and conceptual modifiability of the urban structure type approach allows for the development of central indicators for the simulation of different future scenarios.

**Keywords:** Urban Structure Type Approach, Climate Change, Southeast Asia,

## **1 Introduction**

The so-termed Megacities have been seen to increase globally in recent decades. Resultantly their problem fields have become ever more diverse and complex, so that classical town planning in the sense of spatial planning faces new challenges.

In order to address the issue of integrated and lasting town and urban development, innovative solutions and approaches have been discussed since 1980's. At the same time, global and regional climate change presents a major challenge for the integration of different disciplines in the development plans.

This contribution describes a conceptual model for interfacing multi-disciplinary approaches and governance measures into urban environmental planning. Based on the

extended 'Urban Structure Type (UST) <sup>1</sup> approach' the proposed model represents an interpretative method to respond and adapt to the impacts of climate change. It focuses on how to integrate climate change risks and hazards with information and indicators that describe both the exposure and sensitivity of the highly-dense urban areas of Asian megacities such as Ho Chi Minh City (HCMC), Vietnam.

## 2 Background

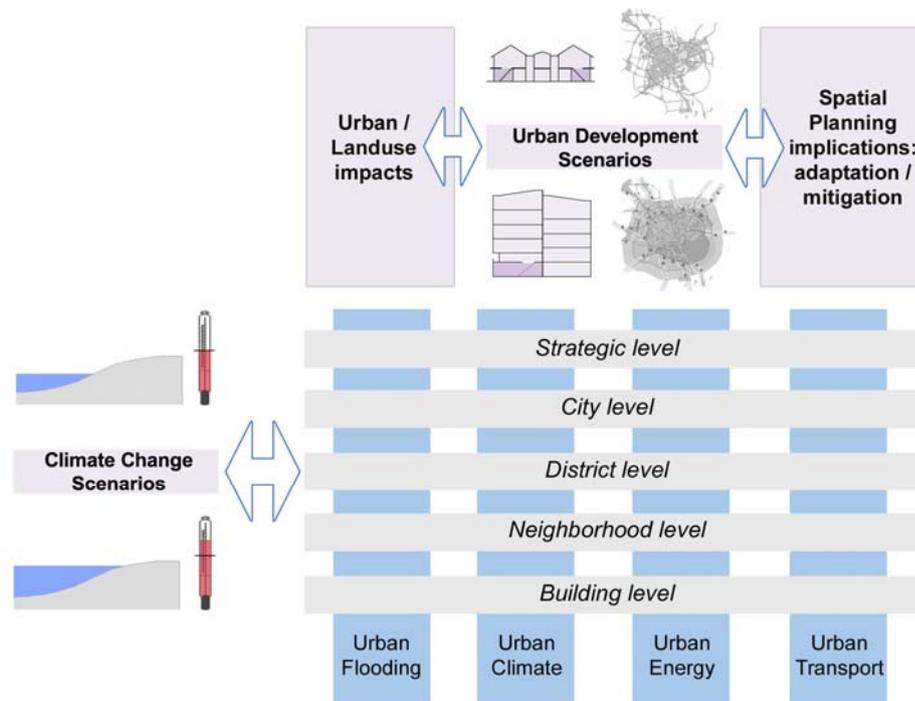
The impacts of climate change are predicted to be unevenly distributed, with many of the greatest challenges to be faced by the mega-urban regions in intra-tropical low elevation coastal areas of Southeast Asia. These regions which have significant climate related hazard exposure are additionally each associated with specific developmental and socio-economic issues that exacerbate this exposure. Concurrently many cities of countries in transition exhibit both a rapid increase in the spatial extent of urbanisation and population density. Vietnam, with more than 3200 km of densely populated lowland coastline, including two major river deltas, the Red River Delta in the north and the Mekong River Delta in the south, upon which the mega-conurbations of Hanoi and HCMC are juxtaposed, is particularly exposed.

HCMC's settlements are integrated in an urban system that is affected by a number of internal and external pressures and resultantly the impacts of climate change on the city, its settlements and infrastructure should be assessed within the context of this complexity. Over the last three decades HCMC, has experienced rapid densification and expansion, with environmental considerations often ignored or neglected, with existing environmental information and its maintenance are often obsolete and outmoded. Within this backdrop, the challenge to adapt to the effects of climate change within the urban-environmental planning arises. Science strives to seek the truth and planning strives for appropriate, comparative or reasonable measures that grasped on (given values) (SCHOLLES, 2008) However both considerations can enable a joint effective procedure with minor costs that utilize available data meaningfully.

Vulnerabilities of lives and livelihood to climate-related environmental processes are primarily the result of inadequate and unsustainable urban planning practices associated with complex natural settings and societal structures (CLARK ET AL.1998).Over the next decades a significant amount of new urban housing developments will be required in Vietnam. These new urban developments will shape the spatial pattern of the urban agglomerations for many decades. It is therefore of highest importance to plan in an integrated manner from the outset, how the spatial development direction in general and how buildings and infrastructure in these highly vulnerable regions can be adapted to cope with the climate change related impacts they are likely to be effected by during their lifetime.

---

<sup>1</sup> Expanded models of UST (Urban structure type): UST are identified through purely physical features while the expanded model is considered on the basis of the utilization of the land use map.



**Figure 1:** Concept. Knowledge of future temperature, precipitation and flooding trends with knowledge of the general urban development path enable assessment of vulnerabilities of the future urban structures in relation to the future climate conditions and make measures manageable.

### 3 Urban Structure Typologies as a Foundation Concept

The impacts of climate change vary considerably from settlement to settlement and even within settlements. The location, urban structure, dominant building type, socio-economic characteristics and institutional capacity are key factors that affect vulnerability and adaptive capacity of a settlement in the mega-urban region. Different discipline-specific methodological approaches to assess the vulnerability of the "urban environment" to climate change risks require a commonly accepted spatial working basis, which ensures that the resulting heterogeneous investigations can be trans-disciplinarily integrated by using an adequate spatially explicit classification.

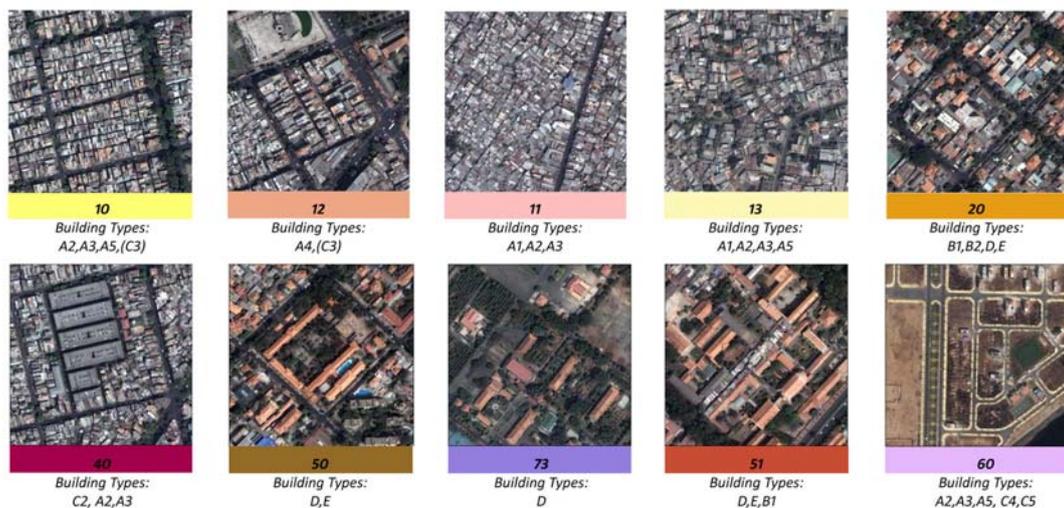
The development and classification of the HCMC Urban Structure Typologies, which are primarily related to Types of Building in the micro level of the urban fabric, offers a central base indicator for different analyses relevant for urban environmental considerations, such as environmental impact assessment, exposure and resilience indicators, and at the same time, an interface for the adaptation strategies to climate

change effects for urban development scenarios. The Base indicators, coupled with energy and climate efficiency indicators for each defined typology allow explicit GIS-supported assessment and prioritization of urban planning adaption and mitigation. (STORCH & ECKERT 2007) At the same time, adaptation strategies to climate change impacts for urban development scenarios can be simulated.

The main task in downscaling climate change assessments to the urban level is that every region has its own urban development issues and possible adaptation options. The resultants UST's are integrated within a planning information systems, to document the direct climate forced consequences at the urban scale, as well as urban feedbacks to the regional climate.

The Urban Structure Typology approach originated through the utilization of remotely sensed imagery to capture the urban physical form and its comprising building structures for the field of urban morphological analysis. It defines primarily an urban block of homogeneous appearance, which may or may not comprise varying building typologies. Through the visual interpretation of remotely sensed images such as aerial photographs or satellite images, the urban structure types can be recognized in the surrounding urban patchwork. Via the utilization of the official land use maps, the structure types themselves can be assigned to the urban block boundaries and spatially redefined.

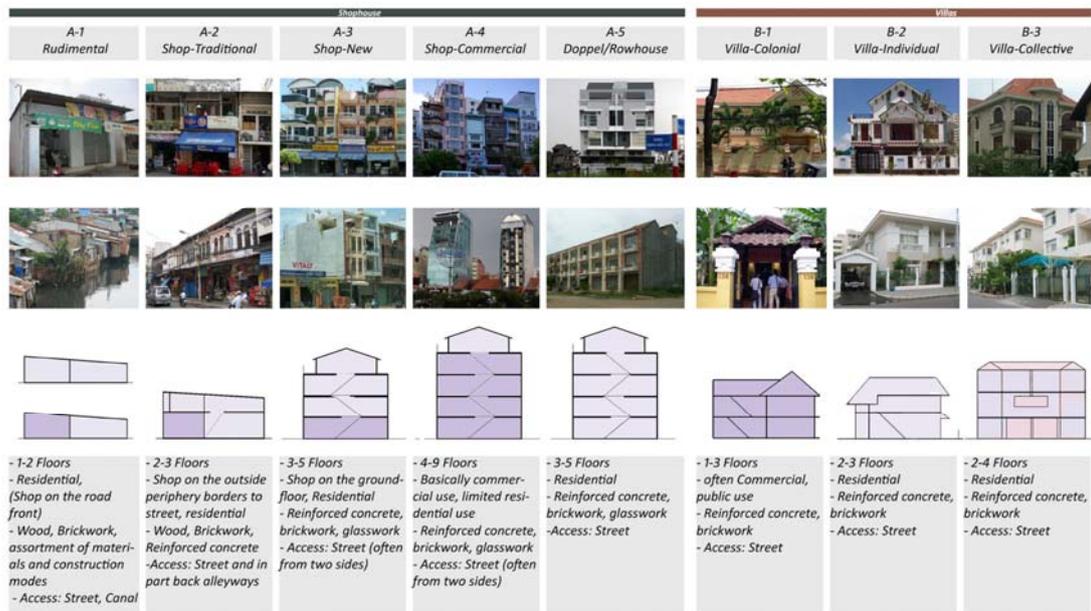
The block size and form is dependent upon the transportation or surface water networks that frame the block, as well as the formal or informal nature of the building typologies. Here the urban infrastructure exerts a dominate role. Other differentiations are made based upon land uses, orientation, structure density and sealing material. Since the most significant and fundamental elements of the UST, lie at the building level, the developing dynamic of urban development can be recognised initially by changes in urban structure and building typologies. On the temporal scale, through the merger and amalgamation of existing building typologies within the block, new building typologies result as the manifestation of development pressure and new building codes and/or regulations.



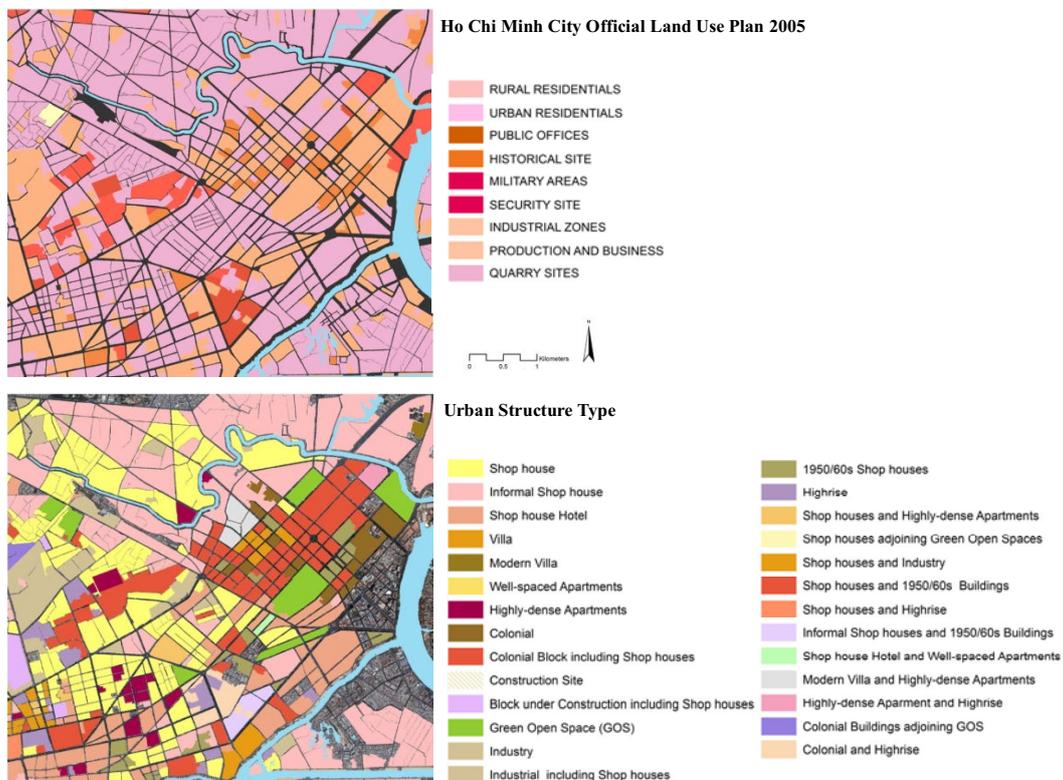
**Figure 2:** Examples of HCMC Urban Structure Types

The urban structure types at the block level comprise of not only single building types but usually out of a combination of several differing building types. Following the visual interpretation and survey of the HCMC urban types, for the residential blocks, four dominate types were identified. The further industrially utilized blocks and the vegetation of the city can be obtained from the LUM when required. The dominate types for residential blocks are Shophouse's, Villas and High densely Apartments in several variations. The Shophouse building type itself is sub divided based on construction, size and usage into the 5 subdivisions.(Figure 3, A-1 to A-5) Every building type exhibits varying physical characteristics through their construction material, building volume, usage and associated open space and access. Resultantly the same building types can be assigned to varying urban Structure Types based on these characteristics. Example would be UST 10 and 11, as seen in Figure 2, which consist of the same building types but varying specifications and characteristics. The urban structure types are coded in ascending fashion for the ease of modification and adaptability of the systems through further findings or for modeling applications i.e. GIS analysis.

Data collected from the study sites, representative of each housing typology, will be used to formulate values for physical resilience and exposure of the building structure based on descriptive indicators. The neighbourhood pattern is represented as an urban puzzle within HCMC, in which the separate urban structural units fit together to form the complete picture of settlement developments. Figure 4 shows the differences in spatial and thematic resolution of the structure type approach compared to the traditional urban land use classification.



**Figure 3:** HCMC Building Types, an important comprising element of Urban Structure Types (illustration Y.J. Jang & K.D. Moon)



**Figure 4:** Comparison of Urban Land Use and Urban Structure Types in HCMC

## 4 Outlook

This spatial concept is the base for the framework to assess the vulnerability of the urban environment in HCMC by reflecting exposure and sensitivity on spatially defined urban structures between the micro- and macro-scale of the city (HAGGAG & AYAD, 2002). Vulnerability assessment is a new field of application for the model of urban structure types such as their exposure to climate-related impacts. Therefore the thematic fields Urban Flooding, Urban Climate and Urban Energy will use this common spatial framework for the spatial definition of their more application oriented exposure and sensitivity units (DEILMANN, 2007).

Via the classification of the changing fabric within the block over a certain time interval, meaningful data regarding the current and future development trend can be obtained. Hence the development and alteration of individual block based UST's is foreseeable, in particular when considering implementation of Transport Master Plans, public investment or changing political will. Thereafter a dynamical UST model, in which future urban development scenarios are combined with future environmental- or adaptation- relevant measures can be developed: An overlap of the development plan with the UST Map assists the exploration of potential structural development in differing planning plain and aids to highlight a manifold of further effective countermeasures, i.e. area facility

management, guidelines for the intended building under construction in light of urban flooding or urban climate considerations, utilization of building restriction and distribution of optimal energy and infrastructure.

## Acknowledgements

The research project 'Integrative Urban and Environmental Planning for Adaptation Ho Chi Minh City to Climate Change - Sustainable Strategies for Climate-Oriented Urban Structures, Energy-Efficient Housing Typologies and Comprehensive Environmental Protection for Megacities of Tomorrow' is financed as part of the new research programme 'Sustainable Development of the Megacities of Tomorrow' by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Following an evaluation of the preoperational phase of the project 'Sustainable Housing Policies for Megacities of Tomorrow - the Balance of Urban Growth and Redevelopment in Ho Chi Minh City' (2005-2008), the main phase of the BMBF-research programme, now focuses on "energy- and climate-efficient structures in urban growth centres", initiated mid 2008 and will run up to 2013 ([www.emerging-megacities.org](http://www.emerging-megacities.org)). Coordinated by the lead partner Brandenburg University of Technology Cottbus, a multi-disciplinary German, European and Vietnamese team, aims to develop an integrated "Adaptation Planning Framework for Climate Change in the Urban Environment of Ho Chi Minh City" ([www.megacity-hcmc.org](http://www.megacity-hcmc.org)).

## 5 References

- [1] Clark, G.E., Moser, S.C., Ratick, S.J., Dow, K., Meyer, W.B., Emani, S. Jin, W., Kasperon, J.X., Kasperon, R.E. and Schwarz, H.E. (1998) Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA., USA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 3: pp. 59-82.
- [2] Deilmann, C.: High-Resolution Damage Simulation Flood Damage to Residential Properties. In J. Schanze (Ed.), *Flood Risk Management Research. From Extreme Events to Citizens Involvement. Proceedings European Symposium on Flood Risk Management Research (EFRM 2007)*, 6th-7th February 2007 pp. 90-96, Germany: Dresden: IÖR.
- [3] Frank Scholles: *Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung* 2008) pp.360
- [4] Haggag M.A. and Ayad H.M.: The urban structural units method: a basis for evaluating environmental prospects for sustainable development, *Urban Design International*, Volume 7(12), Number 2, June (2002), pp. 97-108.
- [5] Storch, H. and Eckert, R. GIS-based Urban Sustainability Assessment. In: Kappas, M.; Kleinn, C. and Sloboda, B. (Eds.): *Global Change Issues in Developing and Emerging Countries, Proc. 2nd Göttingen GIS & Remote Sensing Days, 4th-6th October 2006, Göttingen, Germany*. Göttingen: Universitätsverlag, pp. 17-28.

# Möglichkeit zu Monitoring und Simulation im Bereich der Gasautomation am Beispiel der CO<sub>2</sub>- Flächenmessung mit Hinblick auf die Multisensortechnik

Thomas Dach  
Thomas.Dach@aut.tu-freiberg.de  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Freiberg  
Lessingstraße 45, 09596 Freiberg

Prof. Dr. Andreas Rehkopf  
Andreas.Rehkopf@aut.tu-freiberg.de  
Institut für Automatisierungstechnik  
TU Freiberg  
Lessingstr. 45, 09596 Freiberg

## Kurzfassung

Unter den Maßnahmen, die zum Aufhalten des Klimawandels eingesetzt werden können, bietet die CCS-Technologie (engl. Carbon Capture and Storage) eine interessante und vielversprechende Möglichkeit für die Senkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration (CO<sub>2</sub>-Konzentration) in der Atmosphäre. Im folgenden Beitrag werden Ansätze für ein Monitoringsystem und dessen Simulation vorgestellt, welche einen Beitrag zur Gewährleistung der Sicherheit von CCS bieten sollen.

## 1 Grundlagen

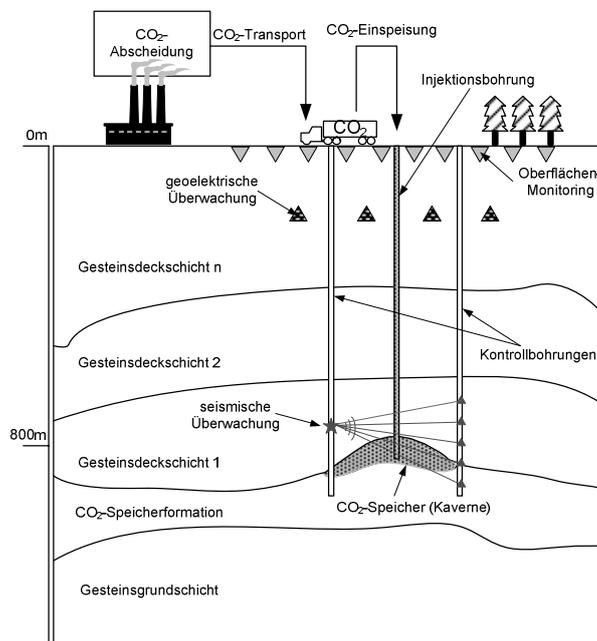
Die CCS-Technologie ist besonders für den Einsatz in Verbrennungskraftwerken geeignet, welche fossile Brennstoffe verwenden (z.B. Kohlekraftwerke); sie beinhaltet die CO<sub>2</sub>-Abscheidung direkt im Kraftwerk (a), den Transport des Kohlenstoffdioxids (b) und der dauerhaften CO<sub>2</sub>-Speicherung (c).

Beim Schwerpunkt (c) „CO<sub>2</sub>-Speicherung“ existieren sowohl noch ungelöste Sicherheitsfragen und realisierungstechnische Probleme, aber auch fehlende Akzeptanzbereitschaft in der Bevölkerung, was zu einem breiten Aufklärungsbedarf führt.

Für die CO<sub>2</sub>-Speicherung werden im Allgemeinen geologische Speicheroptionen favorisiert. Als Untergrundspeicher stehen z.B. ausgeförderte Erdgas- und Erdölfelder, Kavernen, tiefe saline Aquifere oder nicht abbaubare Kohleflöze zur Verfügung [1].

Am Institut für Automatisierungstechnik an der TU-Bergakademie Freiberg wird an einem CO<sub>2</sub>-Monitoringsystem gearbeitet [2]. Mit diesem System sollen die automatisch erfassten Messdaten der Kohlenstoffdioxidkonzentrationen in der Erdbodenoberfläche über dem CO<sub>2</sub>-Speicher ausgewertet und visualisiert werden.

Über die Monitoring-Systeme können so Leckagen, über die ein CO<sub>2</sub>-Austritt erfolgen kann, im Boden detektiert, aber auch Fehlfunktionen oder Ausfälle der Sensorik festgestellt werden, wie Bild 1 illustriert.



**Bild 1:** Skizzierung der CCS-Technologie mit den Überwachungssystemen (aus [3])

## 2 Methodik zum Monitoringsystem

Über dem zu beobachtenden Gebiet wird ein 2D-Raster definiert, dessen Knoten die Messpunkte darstellen. Die Abstände zwischen den Knotenpunkten müssen nicht zwangsläufig äquidistant sein und werden je nach geologischer Oberflächenstruktur festgelegt.

Eine bis jetzt gängige Methode der CO<sub>2</sub>-Messung in der oberen Erdschicht ist die manuelle Entnahme von Bodenluftproben. Dieses Verfahren ist sehr zeitaufwändig und erfordert vom durchführenden Personal sehr viel Erfahrung. Festgelegt ist die fachgerechte Probenentnahme für CO<sub>2</sub> in der VDI-Richtlinie 3865 Blatt 2.

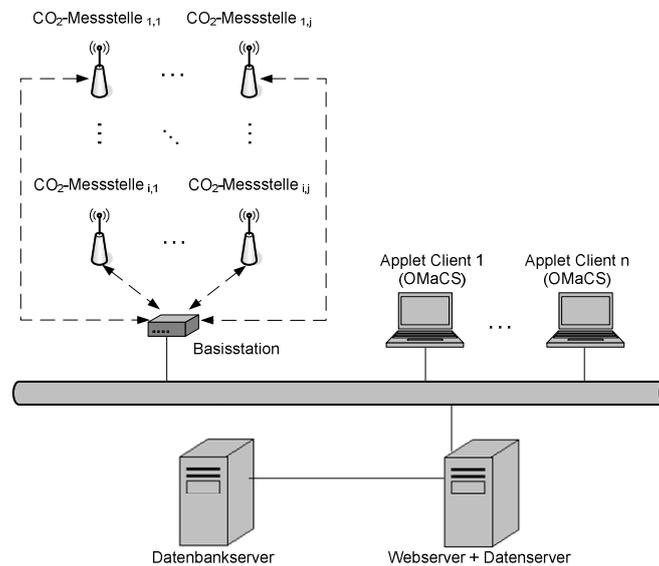
Diese Richtlinie bildet auch die Basis für die hier vorgestellte automatisierte Kohlenstoffdioxidbestimmung im Erdboden.

In den ermittelten Messpunkten des 2D-Rasters werden CO<sub>2</sub>-Sensoren eingebracht.

Über ein Multisensorsystem wird Redundanz und Diversität gewährleistet [5]. Dafür werden CO<sub>2</sub>-Sensoren eingesetzt, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten (z.B. NDIR, photoakustische Spektroskopie). Fehlfunktionen einzelner Sensoren können über Plausibilisierungsverfahren erkannt werden [6]. Durch Fusionsalgorithmen kann die Güte der Signalwerte verbessert werden [7]. Die Übertragung der Messdaten zur Basisstation erfolgt über WLAN.

Als Monitoring-System wird das Programm „OMaCS“ (Online Management and Control System) eingesetzt [4]. Die CO<sub>2</sub>-Sensoren übertragen die Messdaten an eine Datenbank,

auf die auch OMaCS zugreift, um die benötigten Daten weiter zu verarbeiten und zu visualisieren (siehe Abb. 2).



**Bild 2:** Schematisierte Darstellung der Datenübertragung und des Monitoring

### 3 Methodik zur Simulation

Um für die Sensoren die optimalen Positionen über dem zu überwachenden Areal zu ermitteln und somit alle möglichen Leckagen zu detektieren, wird von dem Untersuchungsgebiet ein 3D-Modell in der Simulationssoftware MATLAB / Simulink erstellt. Durch Variation der Sensorabstände und der lokalen Sensoranzahl erfolgt unter vorgegebenen Leckageannahmen eine Positionsbestimmung. Dabei wird gleichzeitig der Drift des CO<sub>2</sub> im Erdboden zu geologischen Senken untersucht, um Rückschlüsse auf eine Vorgehensweise in Bezug der Sensorpositionen zu treffen.

### 4 Literatur

- [1] *Fishedick, M.; Esken A.; Luhmann H.-J.; Schüwer D.; Supersberger N.*: Geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung als klimapolitische Handlungsoption. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2007.
- [2] *Dach, Thomas*: Ein Beitrag zur Untersuchung der Kohlendioxid-Untergroundspeicherung unter automatisierungstechnischen Gesichtspunkten.

Diplomarbeit am Institut für Automatisierungstechnik der TU Bergakademie Freiberg, September 2009.

- [3] <http://www.co2sink.org/newslines/Flyer1.pdf>, 09.07.2009, CO2SINK - CO2 Storage by Injection into a Saline Aquifer at Ketzin
- [4] *Bräuer, D.; Rehkopf, A.*: Online Management and Control System for growing of monocrystal semiconductor materials in multi-zone furnaces, Tagungsband: S. 1072-1075, IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2008, Hamburg
- [5] *Rehkopf, A.*: Multisensorische Ortung im spurgeführten Verkehr. Signal + Draht (Rail Signalling + Telecommunication) 1999, Heft 7 +8
- [6] *Siemens AG, Rehkopf, A.*: Verfahren zur Einzelsensor-Fehlererkennung bei einem Verbund diversitärer Ortungssensoren. Patent beim Deutschen Patentamt 2004 und Europäischen Patentamt 2004.
- [7] *Siemens AG, Rehkopf, A.*: Verfahren einer Vertrauensintervall-Bestimmung zur sicheren Ortung. Patent beim Deutschen Patentamt 2002 und Europäischen Patentamt 2002.

# Effektive Techniken zur Schallfeldberechnung von mehrkanaligen Ultraschallwandlern

Bożena Lamek<sup>1</sup>, Stephan Creutz<sup>2</sup>, Frank Schubert<sup>1</sup> und Gerald Gerlach<sup>3</sup>  
bozena.lamek@izfp-d.fraunhofer.de

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden  
Maria Reiche Str. 2, 01109 Dresden

<sup>2</sup>Fakultät Informatik, Heinz-Nixdorf-Stiftungsprofessur für Systems Engineering,  
TU Dresden, 01069 Dresden

<sup>3</sup>Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Festkörperelektronik,  
TU Dresden, 01069 Dresden

## Kurzfassung

Die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) ist ein explizites numerisches Verfahren zur Simulation der Wellenausbreitung im Zeitbereich [1,2]. Ähnlich zu anderen numerischen Verfahren, wie zum Beispiel FEM oder FDTD, diskretisiert man hier das Berechnungsvolumen mit räumlichen Gitterzellen. Die Größe einer Gitterzelle orientiert sich dabei an der kleinsten Wellenlänge im Zeitsignal. Die Berechnung des dreidimensionalen Schallfeldes von hochfrequenten Ultraschallwandlern mithilfe des EFIT-Algorithmus war auf handelsüblichen PCs aufgrund des hohen Rechenaufwandes bislang gar nicht oder nur eingeschränkt möglich.

In diesem Beitrag werden Ansätze zur Reduzierung der Rechenzeit diskutiert. Im Einzelnen sind das:

- Eine Hybridmethode, die die EFIT-Technik mit der transienten Punktquellensynthese verbindet (EFIT-PSS)
- Eine Parallelisierung des EFIT-Codes

Die oben genannten Ansätze werden zuerst theoretisch besprochen und dann zur Berechnung des Schallfeldes von mehrkanaligen Ultraschallwandlern eingesetzt.

## 1 Einleitung

In der Medizintechnik werden hochfrequente Ultraschallprüfköpfe mit Frequenzen bis zu 50 MHz insbesondere zur Augen- und Hautdiagnostik eingesetzt. In der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) verwendet man heutzutage Ultraschallwandler mit Frequenzen von einigen Kilohertz (Betonprüfung) bis zu einigen hundert Megahertz (akustisches Mikroskop). Zunehmend werden dabei auch in der ZfP Einzelelementwandler durch mehrkanalige Ultraschallwandler (Phased Arrays) ersetzt. Diese vereinen die Funktion mehrerer Einzelelementwandler in einem und ermöglichen die gezielte Steuerung des Schallbün-

dels. Durch die verzögerte Ansteuerung einzelner Wandler Elemente lässt sich das Schallbündel auf verschiedene Bereiche im Prüfobjekt schwenken und fokussieren.

In [3] wurde ein Hybridverfahren vorgestellt, welches die EFIT-Technik mit der transienten Punktquellensynthese (PSS) verbindet und zur Simulation des Schallfeldes eines Einzelelementwandlers eingesetzt wurde. Im vorliegenden Beitrag wird diese Methode auf die Berechnung des Schallfeldes eines Ultraschallarrays erweitert.

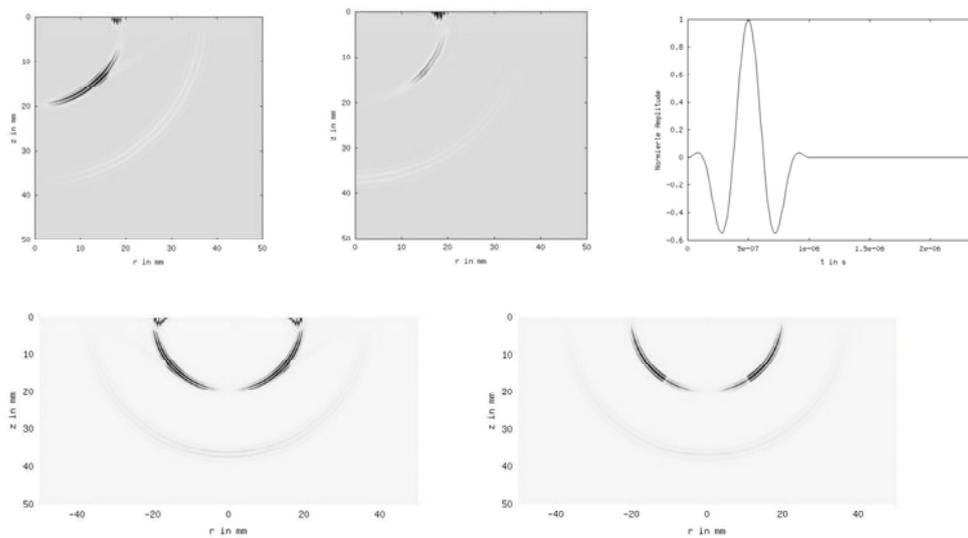
## 2 Theoretische Grundlagen der EFIT-PSS-Technik

Die Schallfeldberechnung von Ultraschallwandlern mithilfe der EFIT-PSS-Technik verläuft in zwei Schritten:

- Berechnung des Schallfeldes einer Bezugspunktquelle nach einer transienten Normalkraftanregung
- Dreidimensionale transiente Punktquellensynthese

Die Bezugsquelle befindet sich z.B. an der Grenzfläche zwischen Luft und Stahl im Ursprung des Koordinatensystems. Bei Normalkraftanregung handelt es sich dabei um ein achsensymmetrisches Wellenausbreitungsproblem. Zur effektiven Berechnung des Schallfeldes einer Bezugsquelle verwenden wir die EFIT-Technik in zylindrischen Koordinaten (CEFIT) [2]. Damit lässt sich das räumliche 3D-Problem auf ein zweidimensionales in der  $r/z$ -Ebene reduzieren. Die Simulation liefert für jeden festgelegten Zeitpunkt die Werte für die  $r$ - und  $z$ -Komponente des Teilchengeschwindigkeitsvektors in jedem Empfangspunkt innerhalb des Berechnungsgebietes. Außerdem ist für jeden Empfangspunkt sein Abstand zur Bezugsquelle bekannt. Diese Wellenmomentaufnahmen (siehe Bild 1) sind der Ausgangspunkt für die nachfolgende Punktquellensynthese. Das Bild 1 stellt ein typisches Schallfeld einer Punktquelle dar: man erkennt halbkreisförmige (genauer halbkugelförmige) Wellenfronten der Longitudinal- und Transversalwelle, die über zwei Kopfwellen miteinander verbunden sind, sowie die Oberflächenwellen. Die Transversalwelle breitet sich langsamer aus als die Longitudinalwelle und hat im Fernfeld eine charakteristische Nullstelle beim Einschallwinkel  $0^\circ$ . Bei der analytischen Überprüfung in Fernfeldnäherung (Bild 1, unten rechts) fehlen typische Nahfeldeffekte wie Kopfwelle und Oberflächenwellen, die im EFIT-Algorithmus automatisch mit enthalten sind.

Im zweiten Schritt belegen wir die Apertur des Ultraschallwandlers in der  $x$ - $y$ -Ebene mit identischen Punktquellen. Alle Punktquellen strahlen das gleiche Schallfeld wie die Bezugsquelle ab; sie sind lediglich bezüglich der Bezugsquelle in der  $x$ - $y$ -Ebene räumlich und – je nach Anwendung – auch zeitlich verschoben. Durch die Berechnung des räumlichen Abstandes können wir für jede Kombination Punktquelle - Empfangspunkt eindeutig die  $r$ - und  $z$ - Wert aus der Berechnung für die Bezugsquelle extrahieren und in die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ - Komponenten des Teilchengeschwindigkeitsvektors umrechnen. In jedem Empfangspunkt summieren wir anschließend Beiträge von allen Punktquellen innerhalb der Wandlerapertur (dreidimensionale Punktquellensynthese). Die PSS erfolgt direkt im Zeitbereich.



**Bild 1:** Mit CEFIT berechnetes Schallfeld einer Bezugsquelle an der Grenzfläche zu Stahl nach Normalkraftanregung durch einen  $RC2$ -Puls, Mittenfrequenz = 2 MHz, Wellenmomentaufnahme bei  $t = 8,4 \mu\text{s}$ . Obere Zeile:  $r$ - (links) und  $z$ - (Mitte) Komponente des Teilchengeschwindigkeitsvektors (wegen Achsensymmetrie beide berechnet für  $r > 0$ ) und Anregungsimpuls (rechts). Untere Zeile: Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors (links) und analytische Überprüfung in Fernfeldnäherung (rechts).

### 3 Validierung der EFIT-PSS-Technik

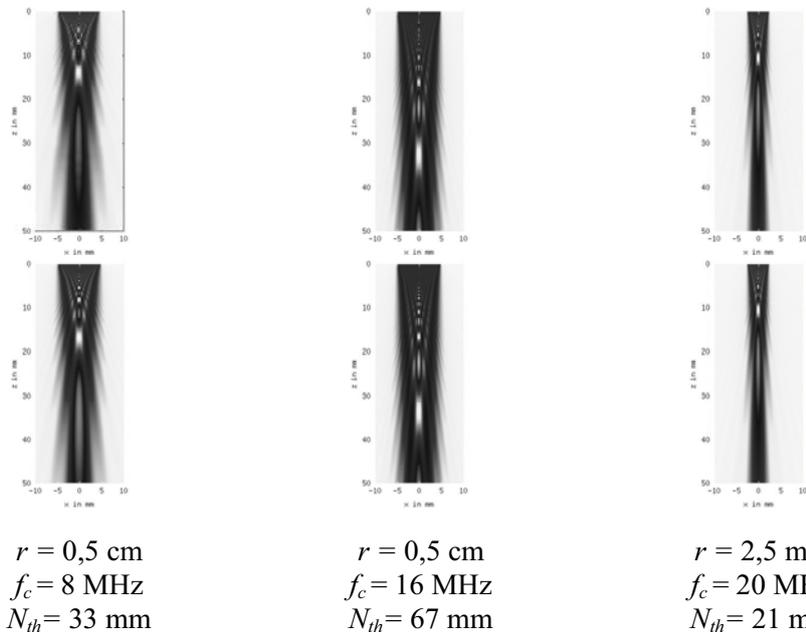
Die Validierung der EFIT-PSS-Technik erfolgt am Beispiel des Schallfeldes eines kreisförmigen Ultraschallwandlers in Stahl. Wir überprüfen den neuen Ansatz für eine monochromatische sowie für eine impulsförmige Anregung. Bei der Validierung für die monochromatische Anregung vergleichen wir die EFIT-PSS-Berechnungen mit der Methode der Gausschen Strahlen. Die theoretischen Grundlagen dieser Methode finden sich beispielsweise in [4]. Bild 2 zeigt die Ergebnisse für drei verschiedene Fälle:

- Wandler mit dem Radius  $r$  von 0,5 cm und mit der Mittenfrequenz  $f_c$  von 8 MHz
- Wandler mit  $r = 0,5$  cm und  $f_c = 16$  MHz
- Wandler mit  $r = 2,5$  mm und  $f_c = 20$  MHz

Dargestellt ist jeweils der Betrag der  $z$ -Komponente des Teilchengeschwindigkeitsvektors. Für alle drei Fälle stimmen die EFIT-PSS-Ergebnisse mit der analytischen Methode gut überein. Es zeigt sich eine typische Nah- und Fernfeldstruktur für alle berechneten Schallfelder. Die Lage der Minima- und Maxima, sowie die Bündelbreite stimmen überein.

Die Validierung für die impulsförmige  $RC2$ -Anregung erfolgt mit zwei Methoden:

- Numerischer Vergleich mit der konventionellen CEFIT-Technik (ohne PSS)
- Vergleich mit der analytischen Punktquellensynthese in Fernfeldnäherung

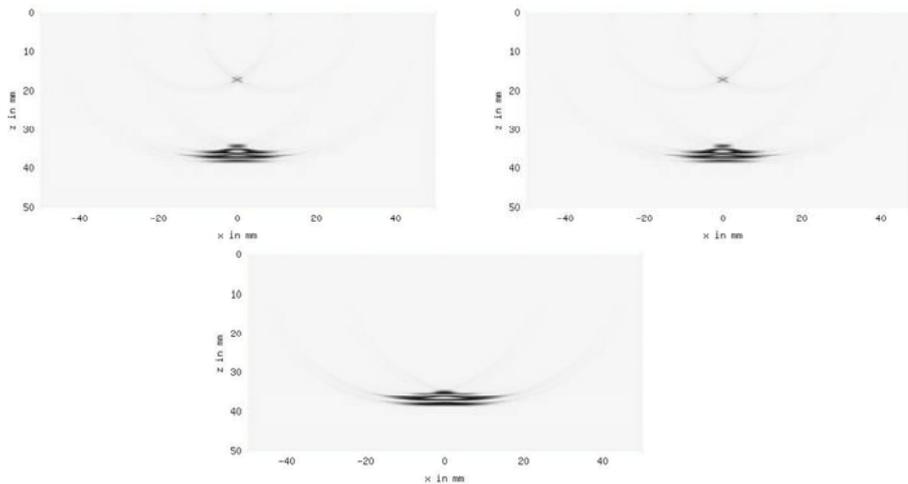


**Bild 2:** Validierung der EFIT-PSS-Technik mit der Methode der Gauschen Strahlen. Schallfeld von kreisförmigen Wandlern für monochromatische Anregung. Obere Zeile: numerisch (EFIT-PSS), untere Zeile: analytisch. Dargestellt ist Betrag der  $z$ -Komponente des Teilchengeschwindigkeitsvektors als  $x$ - $z$ -Schnitt bei  $y = 0 \text{ cm}$ , alle Berechnungen in Stahl.  $r$ : Wandlerradius,  $f_c$ : Mittenfrequenz,  $N_{th}$ : theoretisch berechnete Nahfeldlänge.

In Abschnitt 2 haben wir bereits die CEFIT-Technik erwähnt. Mit dieser Technik kann man das Schallfeld eines kreisförmigen Wandlers (was ebenfalls ein achsensymmetrisches Problem darstellt) berechnen. Die Anregung wird über Kraftdichtequellen innerhalb der Apertur realisiert. Die CEFIT-Berechnung sollte dann mit der Simulation mithilfe der EFIT-PSS-Technik in der  $x$ - $z$ -Ebene bei  $y = 0 \text{ cm}$  übereinstimmen. Bild 3 zeigt den Vergleich zwischen der EFIT-PSS-Berechnung und der CEFIT-Simulation. Die Übereinstimmung ist sehr gut, obwohl die räumliche Schrittweite bei der EFIT-PSS-Berechnung in diesem Fall nur  $\lambda/5$  ( $\lambda$ -minimale Wellenlänge) beträgt. Im Gegensatz dazu ist bei der CEFIT-Technik eine Gitterweite von mindestens  $\lambda/10$  notwendig.

Das Schallfeld eines kreisförmigen Wandlers ist folgendermaßen zu interpretieren: jede Punktquelle innerhalb der Apertur sendet eine Longwelle aus, die in Vorwärtsrichtung die größten Amplitude aufweist. Die Longwellen von allen Punktquellen überlagern sich daher zu einer ebenen Hauptwellenfront. Die ebenfalls von der Punktquelle ausgesendeten Transversalwellen weisen dagegen in Vorwärtsrichtung eine charakteristische Nullstelle auf. Daher kann sich keine ebene Scherwellenfront ausbilden. Es sind lediglich die Scherwellen der Aperturkanten und Rayleighwellen sichtbar.

Zusätzlich zu den numerischen Lösungen zeigt das Bild 3 (unten) das gleiche Schallfeld, berechnet mit der analytischen Punktquellensynthese in Fernfeldnäherung. Die dazu verwendete Formel ist in [5] zu finden. Zu beachten ist hierbei, dass in der analytischen Lösung nur Druckwellen, jedoch keine Scher- und Oberflächenwellen berücksichtigt sind.

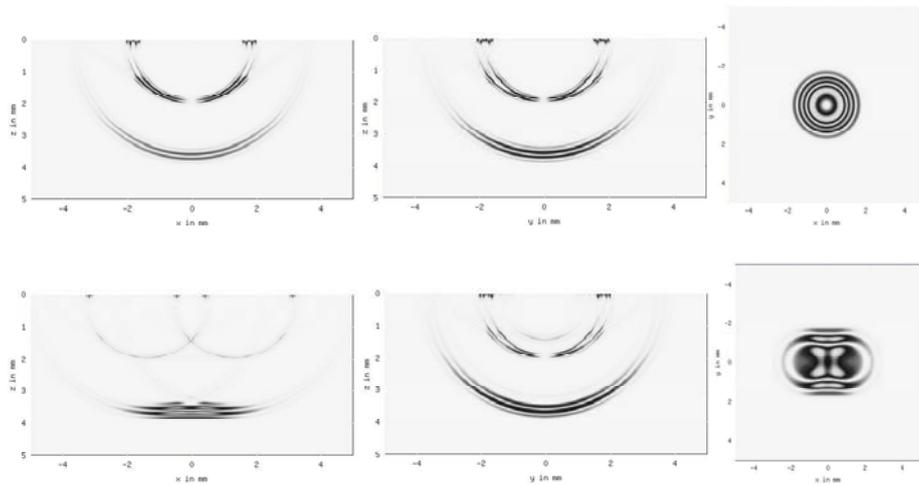


**Bild 3:** Validierung der EFIT-PSS-Technik für die impulsförmige Anregung (*RC2*-Puls). Schallfeld eines kreisförmigen Ultraschallwandlers mit  $r = 1$  cm und  $f_c = 2$  MHz in Stahl bei  $t = 8,4$   $\mu$ s. Dargestellt ist der Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors. Obere Zeile: EFIT-PSS (links), x-z-Schnitt bei  $y = 0$  cm und CEFIT (rechts), r-z-Schnitt. Untere Zeile: analytische Berechnung in Fernfeldnäherung (ohne Scher- und Rayleighwellen).

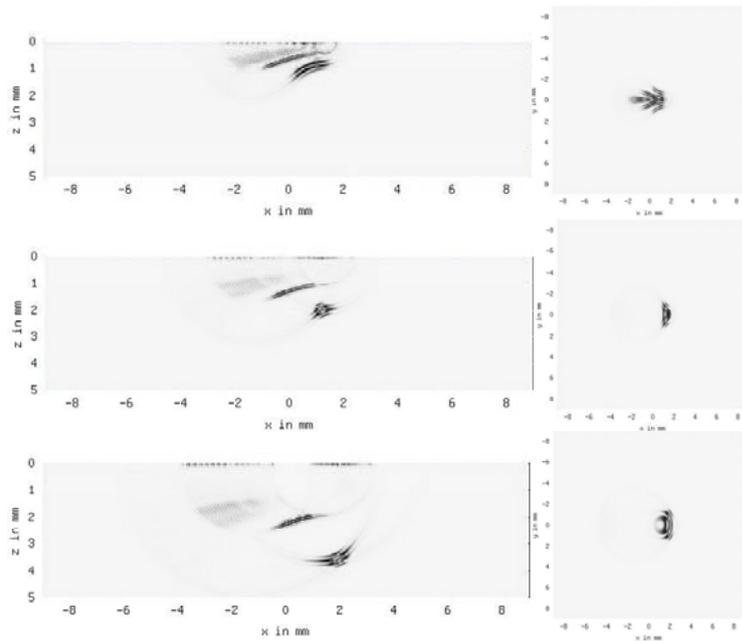
## 4 Berechnung des Schallfeldes eines hochfrequenten Linienarrays

Die große Stärke der EFIT-PSS-Technik liegt darin, dass auf der Basis einer einzelnen achsensymmetrischen Rechnung auch nichtachsensymmetrische Probleme in 3D effizient gelöst werden können. Als Beispiel dafür berechnen wir das Schallfeld eines 17 MHz - Linienarrays mit 16 Elementen. Die Arrayelemente sind Rechtecke mit den Seitenlängen 0,17 mm ( $0,5\lambda$  in Stahl) in  $x$  - Richtung und 0,26 mm ( $0,7\lambda$  in Stahl) in  $y$  - Richtung. Die Gesamtausdehnung in  $x$  - Richtung beträgt 2,72 mm. Der Arraymittelpunkt befindet sich im Ursprung des Koordinatensystems. Bild 4 zeigt das Schallfeld eines Einzelelementes sowie des Gesamtarrays als Schnapschüsse bei  $t = 0,84\mu$ s.

Zur Verbesserung der Ortsauflösung zwecks Identifizierung von Fehlstellen im Material kann man die Ultraschallenergie mithilfe eines Linienarrays auf beliebigen Punkt im Raum fokussieren und schwenken. Bild 5 zeigt die Wellenausbreitung zu verschiedenen Zeitpunkten bei der Fokustiefe von 2,5 mm unter dem Schwenkwinkel  $30^\circ$  und Bild 6 für die Fokussierung auf der Achse. Die Verzögerungszeiten wurden für die Longitudinalwelle berechnet.



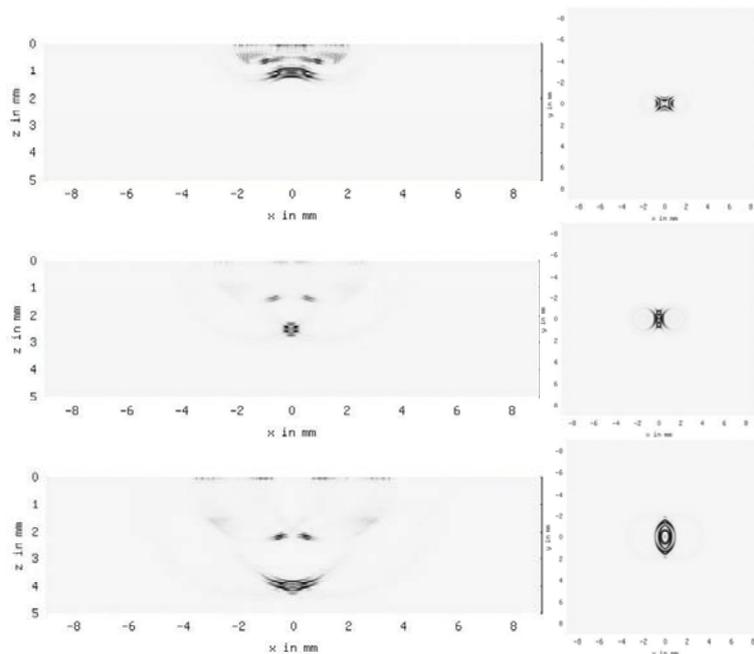
**Bild 4:** Schallfeld eines rechteckigen Einzelements des Linienarrays (oben) und eines Gesamtarrays mit 16 Elementen und Mittenfrequenz von 17 MHz (unten) in Stahl bei  $t = 0,84\mu\text{s}$ . Dargestellt ist der Betrag des Teilchengeschwindigkeitsvektors. Links:  $x$ - $z$ -Schnitt bei  $y = 0$  mm, Mitte:  $y$ - $z$ -Schnitt bei  $x = 0$  mm, rechts:  $x$ - $y$ -Schnitt bei  $z = 3,5$  mm.



**Bild 5:** Wellenfronten eines 17 MHz - Linienarrays für drei verschiedene Zeitpunkte, Fokustiefe: 2,5 mm, Schwenkwinkel:  $30^\circ$ . Links:  $x$ - $z$ -Schnitt bei  $y = 0$  mm, rechts:  $x$ - $y$ -Schnitt durch die aktuelle Position der Hauptwellenfront. Von oben nach unten:  $t = 0,25 \mu\text{s}$ ,  $t = 0,42 \mu\text{s}$ ,  $t = 0,67 \mu\text{s}$ .

## 5 Parallele Implementierung des CEFIT-Algorithmus

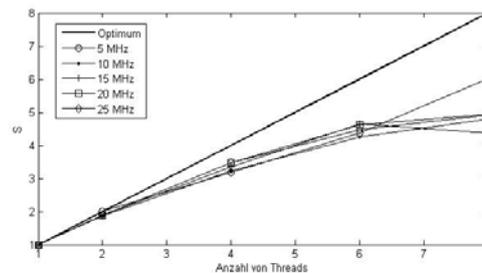
Für die effektive Berechnung des Schallfeldes einer Bezugspunktquelle wurde eine parallele Version des CEFIT - Codes implementiert. Für die Schleifenparallelisierung wurde OpenMP benutzt. OpenMP ist eine Sprachenerweiterung, die es einem Compiler erlaubt, parallel ausführbare Abschnitte zu erkennen und Code zu generieren, der mehrere Threads verwendet. Der Programmierer muss sich in diesem Fall nicht um die Details der Erzeugung von Threads kümmern, die Synchronisierung der Threads erfolgt weitestgehend automatisch. Es sind bereits Veröffentlichungen bekannt, so zum Beispiel [7], wo der parallele EFIT-Code für die Berechnungen mithilfe eines Hochleistungsrechners implementiert wurde (Threadanzahl:128). Wir konzentrieren uns im Folgenden auf Testrechnungen auf einem handelsüblichen PC mit acht Prozessorkernen (Dell, 2.4 GHz Taktfrequenz, 8 GB RAM). Zur Beurteilung des Performance verwenden wir den Parameter  $S$  (speedup), der das Verhältnis der Laufzeit des sequentiellen Programms zur Laufzeit des parallelen Programms darstellt.



**Bild 6:** Wellenfronten eines 17 MHz - Linienarrays für drei verschiedene Zeitpunkte, Fokustiefe: 2,5 mm, Schwenkwinkel: 0°. Links:  $x$ - $z$ -Schnitt bei  $y = 0$  mm, rechts:  $x$ - $y$ -Schnitt durch die aktuelle Position der Hauptwellenfront. Von oben nach unten:  $t = 0,17 \mu\text{s}$ ,  $t = 0,42 \mu\text{s}$ ,  $t = 0,67 \mu\text{s}$ .

Bild 7 zeigt Beschleunigungskurven des CEFIT-Codes. Berechnet wurde für verschiedene Frequenzen im Bereich von 5 bis 25 MHz (Berechnungsgebiet  $5 \times 5$  cm in Stahl, Zeitfenster 15  $\mu\text{s}$ ). Dabei steigt die Anzahl der notwendigen Gitterzellen bei Verdopplung

der Frequenz um den Faktor 4. Die gemessenen  $S$  - Werte sollten besser als die der sequentiellen Ausführung sein und möglichst nahe am idealisierten Optimum liegen. Wegen Synchronisationsproblemen wird aber zum Beispiel bei  $f = 5$  MHz für acht Prozessoren lediglich  $S = 5$  erreicht.



**Bild 7:** Beschleunigung ( $S$ ) des CEFIT-Codes als Funktion der Threadanzahl.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir eine hybride Simulationstechnik (EFIT-PSS) zur Berechnung des Schallfeldes von Ultraschallwandlern vorgestellt. Diese Technik bietet eine Reihe von Vorteilen: Berücksichtigung aller Wellenphänomene inklusiv Wellenumwandlung und Oberflächenwellen, effektive dreidimensionale Berechnung auch für nichtachsensymmetrische Probleme, Reduzierung von Rechenzeit und Speicherplatz im Vergleich zu rein numerischen 3D EFIT - Rechnungen in kartesischen Koordinaten, unkomplizierte Schallfeldberechnungen für Ultraschallwandler mit zeitverzögerter Anregung (wie die in diesem Beitrag vorgestellten mehrkanaligen Ultraschallwandler). Das Verfahren kann auf geführte Wellen (Lambwellen) in plattenförmigen Strukturen ausgedehnt werden. Damit kann diese Technik - alternativ zu (halb-)analytischen Verfahren- zur Optimierung von Ultraschallwandlern eingesetzt werden. Zukünftig kann diese Methode zum Beispiel zur Modellierung des Schallfeldes von Matrixarrays verwendet werden. Im Gegenteil zu traditionellen Arraysysteme in der ZfP wie Linienarrays (nur 2D-Schwenken möglich) und Ringarrays (nur Fokussierung auf der Achse, kein effektives Schwenken möglich) kann man mit einem Matrixarray auf jeden Punkt im 3D-Raum fokussieren und nahezu beliebige räumliche Schwenkwinkel realisieren.

## 7 Literatur

- [1] *Marklein R.*: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik. Kassel: Shaker Verlag, 1997.
- [2] *Schubert F.*: Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques - Theory and applications, *Ultrasonics* 4 (2004), 221-229.

- [3] *Schubert F., Lamek B.:* 3-D ultrasonic transducer modeling using the elastodynamic finite integration technique in combination with point-source-synthesis. In: Proceedings of 4th International Workshop “NDT in Progress” (2007), S. A1-A10.
- [4] *Schmerr L.W., Song S.-J.:* Ultrasonic nondestructive evaluation systems: models and measurements. New York: Springer Verlag, 2007.
- [5] *Langenberg K.-J., Marklein R., Mayer K.:* Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall. München: Oldenbourg Verlag, 2009.
- [6] *Hoffmann S., Lienhart R.:* OpenMP: eine Einführung in die parallele Programmierung mit C/C++. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2008.
- [7] *Nakahata K, Tokunaga J., Kimoto K., Hirose S.:* A large scale simulation of ultrasonic wave propagation in concrete using parallelized EFIT. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 2 (2008), S.1462-1469.

# **Optimization model for minimize the marginal power generation cost and marginal pollution cost in the power plant**

Shirin Esmaili and Hamed Shakouri  
shirin.esmaili@yahoo.com; h.shakouri@gmail.com  
Industrial Engineering Department of the Engineering Faculty,  
University of Tehran, Iran

## **Abstract**

Energy issues are directly related to the development of a country and the living standards of its people. Energy optimization is one of the effective and operative tools to reach the steady development in all over the world. Subsidy to consumption and production of electricity production by fossil fuel, social costs are some of the hide costs. Also the marginal costs for controlling environmental pollution made by this industry are another hide cost. In this research, the only hide cost considered is social cost for air pollution such as SO<sub>2</sub>, Nox and CO<sub>2</sub>. Electricity production cost from different technologies including plant fuel cost, investment and deprecation cost, operation and maintenance costs (O & M cost), air pollution cost are the marginal power generation cost. This paper describes a mathematical modelling approach to minimize the generation cost and social cost for power generation from different technologies at different modes of demand (base, medium, peak mode) with a list of constraints such as sufficient supply for each demand of mode and Limited generation capacity at each hour. We present a programming formulation of this optimization problem in which the temporal and structural variations in demand are captured through representative daily load curves. Implementation of such an approach is demonstrated through a case study of the electricity system of Iran. Lingo80 software is used to find optimized amount of cost by different technologies. finally mathematical optimization model is Optimized mixing of power generation by different technologies at different modes of demand (base, medium, peak mode) showed that the energy production by renewable plants compare to fossil fuel plants has economic and justified reasons if subsidy is given to renewable energy plants to develop these plants.

*Keywords:* Optimization model; marginal power generation cost; air pollutants; linear programming; electricity demand; demand mode

## **1 Introduction**

Iran has particular position in terms of electricity industry among neighbouring countries, CIS, Central Asia and Africa. Iran stands among the first 10th countries around the world considering its capabilities in construction and distribution systems and

supplying the required domestic electricity as well as in manufacturing and exporting the related equipments in many parts of the sector and mechanical and engineering services. Total nominal installed capacity of electricity generation in Iran reached over 45138.8 MW in 2006, showing a growth of 10% compared to 2005. In this year share of different types of power plants from total installed capacity was follows: 34.5% for steam, 49.9% for gas turbine and combined cycle, 14.6% for hydro, 0.9% for diesel and 0.1% for solar and power plants. In 2006, electricity generation in the country reached to 192.7 TWh. Compared to the previous year, it shows a growth of about 8.2%. During the period of 2000 to 2006, per capita electricity generation in Iran increased from 1907 KWh to 2733.2 KWh. In fact, it has been growing at an average annual rate of 6.2%.

Those costs incurred to replace, substitute and recover impacts of environmental damages on ecosystems; structures and human health are called environment damage costs. According to the studies of the Iranian department of environment and the world bank, total amount of incurred costs of fossil fuel combustion in different parts of consuming sectors of the country was 65602 billion Rials (according to CBI 1USD=9,525 IRR) in 2006, of which NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH and SPM were reached to 7514, 14219, 11747, 16819, 1264 and 14040 billion Rials respectively.

In 2006, highest emissions were those of CO<sub>2</sub> emissions in the power sector amounting 572.6 g/KWh. Among the thermal power plants, the lowest emissions were those of combined cycle and the highest were that of gas fired power plants [1].

The sentence has been done similar research in this field in Iran hence calculating the cost of electricity from different sources by taking into consideration environmental [2] and modeling optimization and decrease the amount of time and the transferring production plants in an emergency situation the electricity supply [3]

Electric power systems are typically operated at least cost subject to technical and reliability constraints. This paper discusses a mathematical modeling approach to minimize the generation cost and social cost for power generation from different technologies at different modes of demand (base, medium, peak mode) with a list of constraints. We discuss a case study of the electricity generation system of Iran. The aim of this paper is to outline a methodology for Optimized mixing of power generation by different technologies at different modes of demand (base, medium, peak mode).

## 2 The Methodology

The objective function is minimization of the generation costs and social costs.

The optimal solution is obtained subject to a list of constraints as follows:

- Sufficient supply for each demand of mode
- Limited generation capacity at each hour

As a rule the goal of the environmental policy is to achieve the best environmental results, i.e., minimum emission at minimum cost to the system.

The objective function includes the impact of capacity expansion model and capital investment, fuel cost, O & M costs, air pollution cost. Finally mathematical optimization model is optimized mixing of power generation by different technologies at different modes of demand (base, medium, peak mode).

### 3 References

- [1] *Ministry of Energy I.R. Iran, deputy for power & Energy Affairs, Power & Energy planning Department: Energy in Iran 2006. Energy in Iran (2008) s.25, 29, 56, 57.*
- [2] *Kazemi, A. rahimi, GH. Bagherzadeh, A.:* Calculating the cost of electricity from different sources by taking into consideration environmental. Chapter letter studies energy economy 7(2006), s.46-68.
- [3] *Azar, A. haghifam, M. alibabae N.:* Modeling optimization and decrease the amount of time and the transferring production plants in an emergency situation the electricity supply. The journal industrial management 1(2009), s.3-20.

# Ein Agentenbasiertes Modell eines Fußballspiels in Java

M. Bruckner<sup>1,2</sup> und N. Popper<sup>1</sup>

<sup>1</sup>„Die Drahtwarenhandlung“ – Simulation Services, Vienna, Austria;

<sup>2</sup>Vienna University of Technology, Vienna, Austria;

Corresponding Author: M. Bruckner, „Die Drahtwarenhandlung“ – Simulation Services, Vienna, Austria

Neustiftgasse 57-59, 1070 Wien, Austria; bruckner.martin@gmx.at

## 1 Aufgabenbeschreibung

Aufgabe ist die Definition eines einfachen zellulären Automaten Modells. Inhalt dieses Modells ist ein kurzes Fußballspiel. Dabei gibt es 22 Spieler, davon zwei Tormänner, einen Ball und zwei Tore. Regeln wie Foulspiel oder Abseits werden ignoriert. Out Bälle werden durch einführen einer „Bande“, an der der Ball abprallt, vermieden. Weiters ist dieses Modell in einem JAVA-APPLET zu realisieren.

## 2 Theorie Zelluläre Automaten

Ein zellulärer Automat ist ein Gitter von diskreten identischen Zellen, die sich jeweils in einem aus einer endlichen Menge von Zuständen befinden. Jede Zelle besitzt eine Umgebung, in der die dieser Zelle benachbarten Zellen liegen. Außerdem gibt es eine Übergangsfunktion, die den Zustand einer Zelle und ihrer Umgebung auf einen Zustand der Zelle abbildet. Diese Übergangsfunktion wird auf alle Zellen gleichzeitig angewandt.

**Vorteile dieses Systems:** Änderungen am Modell sind sehr einfach durch ändern der Übergangsfunktion, im unserem Fall durch hinzu oder weglassen einzelner Regeln, durchführbar.

**Nachteile dieses Systems:** Die oben erwähnte „gleichzeitige Anwendung auf alle Zellen“ ist in der Praxi kaum durchführbar. Der Zustand der Zellen ist also auch von der Abarbeitungsreihenfolge der Zellen abhängig.

## 3 Realisierung

Zur Realisierung dieses Modells wurde eine „Agentenbasierte Simulation“ verwendet, die eng verknüpft mit den zellulären Automaten ist. Im Gegensatz zu anderen Arten der Modellierung haben in der Agentenbasierten Modellierung viele kleine Einheiten (Agenten) Entscheidungs- oder Handlungsmöglichkeiten. Das System-Verhalten resultiert aus dem Verhalten der einzelnen Agenten und wird nicht auf Systemebene vorgegeben.

### Aufbau des verwendeten zellulären Automaten

**Zellraum:** die Größe des Spielfeldes, wurde mit 50x29 Zellen ausgeführt.

**Nachbarschaft:** Moore-Nachbarschaft (8er-Nachbarschaft)

**Zustandsmenge:** leer, Spieler AUT mit Ball, Spieler AUT ohne Ball, Spieler BRD mit Ball, Spieler BRD ohne Ball, Ball

**lokale Überföhrungsfunktion:** wurden in Form von Regeln definiert. Ein Beispiel solch einer Regel wird später noch genauer erklärt.

Zur Realisierung des JAVA-APPLET wurde die Programmieroberfläche ECLIPS verwendet. Um den Bewegungsradius der Spieler einzugrenzen wurde das Spielfeld gedrittelt und jedem Spieler wurde eines der Drittel zugewiesen. Als einzige Einstellmöglichkeit am APPLET kann man die Abarbeitungsreihenfolge der einzelnen Zellen wählen.

**linear:** Die Zellen werden wie üblich von links oben nach rechts unten durchlaufen.

**first offense:** Das Spielfeld wird zweimal linear durchlaufen. Im ersten Durchlauf werden die Zellen der angreifenden Mannschaft abgearbeitet, im zweiten die der verteidigenden.

**first defense:** Analog wie „*first offense*“ nur in umgekehrter Reihenfolge.

Die Eigenschaften jedes Spielers (Alter, Name, Gewicht. . . ) sowie die Spiel- und Passstärke werden in Textdateien abgespeichert und beim Starten des APPLETS geladen.

**Spielstärke (0. . . 1):** Gibt die Zweikampfstärke des jeweiligen Spielers an.

**Passstärke (0. . . ∞):** Gibt an, wie weit der Ball geschossen werden kann.

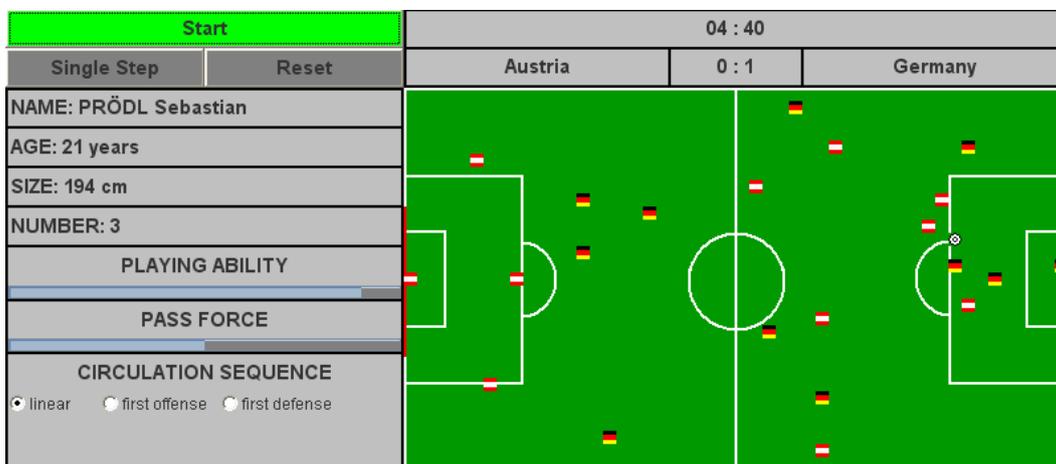
## 4 Das Modell

Wie bereits oben erwähnt besteht das Grundgerüst des Modells aus 50x29 Zellen die je nach Auswahl unterschiedlich durchlaufen werden. Bei jedem Durchlauf wird jede Zelle die nicht leer ist, also auf der sich ein Spieler oder der Ball befindet, klassifiziert (Mannschaftszugehörigkeit, Ballbesitz, Angreifende oder Verteidigende Mannschaft, Tormann oder Feldspieler) und je nach Art der Zelle eine Routine aufgerufen in der sich die für diesen Zellentyp definierten Regeln befinden.

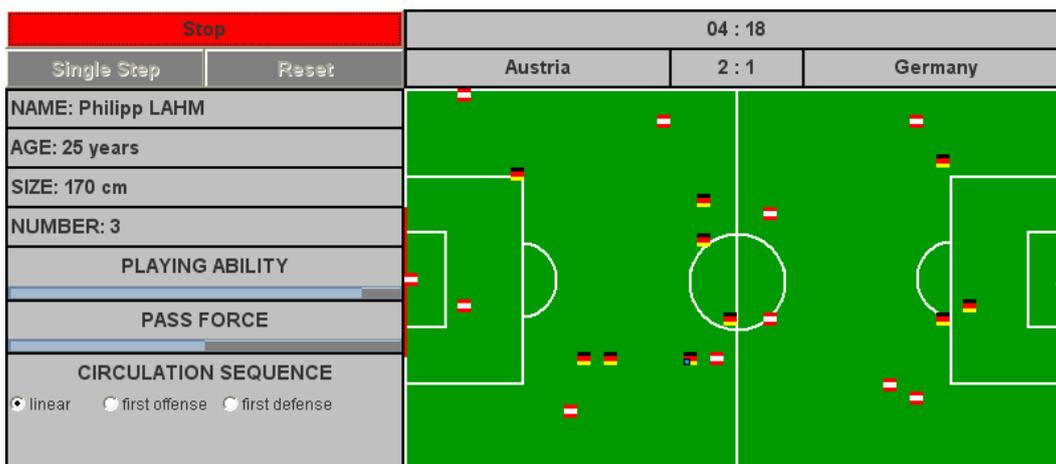
Diese Regeln bewerten die angrenzenden Felder und führen dazu, dass den Feldern eine positive natürliche Zahl zugewiesen wird die das Unbehagen des Spielers angibt sich auf dieses Feld zu begeben. Nach Bewertung aller angrenzenden Felder wird die Zelle mit dem niedrigsten Wert als neuer Standort für den Spieler bzw. Ball ausgewählt. Weisen zwei oder mehrere Zellen identische Zahlen auf wird durch einen Zufallsprozess entschieden wie der nächste Schritt aussieht. Um die Probleme mit der Parallelität der Abarbeitung der Zellen zu kompensieren, wird das Ergebnis in ein zweites Spielfeld, das ebenfalls aus 50x29 Zellen besteht, geschrieben. So wird sich ein bewegen eines Spieler in einem Spielzug um mehr als ein Feld vermieden, dass auftritt, wenn sich ein Spieler von einer Zeile in die darunter liegende Zeile bewegt und dort noch einmal abgearbeitet wird. So wird Schritt für Schritt der komplette Spielablauf simuliert. Das, ebenso Mögliche, Schießen und Passen ist eine Kombination aus Zufall und Entfernung zum Tor bzw. Entfernung zur Grenze des Spielbereiches des trippelnden Spielers. Die Richtung des Schusses bzw. Passes wird durch einen Algorithmus, in dem die Positionen der Mitspieler sowie auch der Gegner analysiert werden, ermittelt. Damit sich der Ball, wie auch in der

Realität, schneller fortbewegt als die Spieler, wird, wenn der Ball sich ‘frei’ bewegt, zwischen zwei Durchläufen ein Zwischenzyklus ausgeführt, der nur die Zelle in der sich der Ball befindet abarbeitet. Nach Abschluss eines Durchlaufs, also nachdem alle Zellen abgearbeitet wurden, wird kontrolliert ob sich um den Ballführenden Spieler ein Spieler der verteidigenden Mannschaft befindet. Wenn ja, kommt es zu einem „Zweikampf“ bei der ein Zufallsprozess, abhängig von der Stärke der jeweiligen Spieler, entscheidet wer den Ball bekommt. Da man bei dieser Simulation genaue Kenntnisse über die innere Funktionsweise des Systems besitzt wird dies auch als White-Box bezeichnet. Im Gegensatz dazu steht die Black-Box bei der die inneren Funktionsabläufe dem Benutzer verschlossen bleiben, also die wie eine gekapseltes Objekt ist, bei der man nur den Input und Output sieht, aber die Zwischenschritte (In unserem Fall das Spiel) im Verborgenen liegen.

Die Bilder 1 und 2 zeigen das in einem JAVA-Applet implementierte Modell.



**Bild 1:** Modell beim Passspiel.



**Bild 2:** Deutscher Spieler beim Trippeln.

Bild 1 illustriert das Modell inmitten eines Passes, während auf Bild 2 ein Deutscher Spieler im Ballbesitz ist (erkennbar an dem blauen Quadrat links unten am Ballführenden Spieler). Die grüne *Start* Taste weist darauf hin, dass das Modell momentan gestoppt ist. Mit *Single Step* ist die Durchführung eines einzelnen Zyklus möglich. *Reset* setzt das Modell in den Ausgangszustand zurück. Die links eingeblendeten Spielerdaten kann man per Mausklick auf den jeweiligen Spieler abfragen. Die rote *Stop* Taste weist darauf hin, dass das Modell läuft. *Single Step* und *Reset* sind im laufenden Betrieb nicht verfügbar und daher ausgegraut.

## 5 Beispiel einer Regel (Angreifer mit Ball)

Je grösser der Wert desto weniger geeignet ist die Zelle für den nächsten Spielzug

1. Ist die Zelle bereits besetzt, hat es natürlich keinen Sinn sie für den nächsten Schritt in Betracht zu ziehen.

```
If(Zelle nicht leer)
{
Wert = max.
} else
{
Wert = 0
}
```

2. Um den Aktionsradius jedes Spielers auf sein Drittel zu beschränken, wird die Lage jeder Zelle kontrolliert.

```
If(Zelle noch in meinem Drittel)
{
Wert = 0
} else
{
Wert = max.
}
```

3. Diese Regel vergleicht die Stärke des Angreifers mit der seiner Gegenspieler. Ist der Angreifer sehr Zweikampfstark neigt er eher dazu sich einen, vielleicht schwächeren, Gegner zu nähern.

```
For(alle gegnerischen Spieler)
{
Switch(Distanz Feindlicher Spieler)
{
Case 1: Wert += 5 x Zweikampfst. Gegner x (1 - Zweikampfst. Angreifer)
Case 2: Wert += 3 x Zweikampfst. .Gegner x (1 - Zweikampfst. .Angreifer)
Case 3: Wert += 2 x Zweikampfst. Gegner x (1 - Zweikampfst. Angreifer)
Case 4: Wert += 1 x Zweikampfst. Gegner x (1 - Zweikampfst. Angreifer)
Default: Wert += 0
}
}
```

4. Eine der Wichtigsten Regeln ist es, sich dem gegnerischen Tor zu nähern.

```
Switch(Nähere ich mich Tor)
{
Case ja:           Wert += 0
Case bleibt gleich: Wert += 2
Case entferne mich: Wert += 4
}
```

## 6 Szenarien

Bei diesem Versuch wurden je 40 Spiele in Folge mit unterschiedlichen Spielerstärken durchgeführt. Die ersten 20 Spiele wurden mit gleicher Spielstärke (Durchschnitt 0.7) und gleicher Passstärke (Durchschnitt 13,6) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Spiele sind in Tabelle 1 in der zweiten Spalte ersichtlich. Bei den zweiten 20 Spielen wurde die Spielstärke der Deutschen Mannschaft im Durchschnitt um 0,2 verringert, die Passstärke blieb unverändert gleich. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 1 in der dritten Spalte abzulesen.

**Tabelle 1:** Ergebnisse von 40 Spielen.

Spiel Nr:	AUT Sp.st = GER Sp.st	AUT Sp.st > GER Sp.st
1	4:3	5:4
2	4:4	6:4
3	10:6	6:4
4	8:5	6:1
5	6:6	5:4
6	5:6	5:2
7	4:4	10:2
8	2:7	4:5
9	4:6	4:5
10	3:4	4:3
11	3:4	6:2
12	5:5	2:5
13	4:4	9:4
14	6:5	3:8
15	5:4	5:6
16	3:6	7:3
17	2:10	6:2
18	5:8	6:8
19	7:6	7:2
20	8:4	10:3
<b>Gewonnene Spiele AUT</b>	<b>7</b>	<b>14</b>
<b>Gewonnene Spiele GER</b>	<b>8</b>	<b>6</b>
<b>Unentschieden</b>	<b>5</b>	<b>0</b>

## 7 Literatur

- [1] *Stephen Wolfram*, Cellular Automata (1983)  
<http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/83-cellular/1/text.html>
- [2] *Wolfgang Golder*, Beziehungskiste aka Party-Planer  
<http://www.golder.de/psion/bkiste/main.html>
- [3] *Wikipedia* Zellulärer Automat  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Zellulärer\\_Automat](http://de.wikipedia.org/wiki/Zellulärer_Automat)
- [4] *Wikipedia* Agentenbasierte Modelle  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Agentenbasierte\\_Modelle](http://de.wikipedia.org/wiki/Agentenbasierte_Modelle)

# **Fab logistics optimization with acp-IT's InFrame Synapse simulation library and XJTek's AnyLogic**

Susan Spitzner and Laurentiu A. Maniu  
info@acp-it.com  
acp-IT AG / Handwerkstr. 29 / 70565 Stuttgart

## **Abstract**

acp-IT AG is a leading IT systems vendor and offers powerful Software solutions for production planning, monitoring and controlling of high-tech manufacturing sites. Founded 2001 as a spin-off from Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation ([FhG IPA](#)) in Stuttgart, acp-IT today is your partner in production IT: MES (Manufacturing Execution System) & PCS (Process Control System) solutions with In-Frame Syn@pse, IT consulting from architecture to project management as well as Logistics & Digital Factory in highly-automated industries.

## **Factory planning, layout design & material flow optimization**

acp-IT supports you during design, simulation and optimization of your production or logistics systems. Therefore we use the simulation AnyLogic from XJ Technologies - a powerful multi-paradigm simulation software capable of modeling systems as a combination of discrete events, system dynamics and agent based models.. Our InFrame Synapse simulation library allows modelling of manufacturing lines in few steps considering the detailed material flow control policies. Therefore, we are able to answer essential questions with regard to factory planning and operation of new or already existing manufacturing lines. In simulation studies we answer your questions with regard to throughput maximization, line balancing and optimum capacity allocation.

## **Emulation of factory & equipment control software**

Our simulation models can also be applied for testing and configuring your Manufacturing Execution System (MES) solution. Simulated control policies can be adopted directly by the MES solutions. The MES can be controlled by the simulation model instead of being connected to the real factory. The simulation model allocates the essential control events and status changes which will be provided by your equipment in the real manufacturing line. Consequently, the software testing of your MES can be done upfront, in a virtual world, enabling early error handling and software configuration according to your needs. As a result, factory ramp up times can be reduced significantly.

# Modelica-Bibliotheken - ein Überblick

Dr. Ingrid Bausch-Gall  
Ingrid.Bausch-Gall@Bausch-Gall.de, BAUSCH-GALL GmbH  
Wohlfahrtstraße 21 b, 80939 München

## Kurzfassung

Modelica ist bekannt als offener Sprachstandard zur Modellierung gleichungsorientierter komplexer physikalischer Systeme. Die Sprachdefinition ist für jedermann zugänglich. Die Sprache wird von der Modelica Association definiert und auf der Homepage [1] veröffentlicht. Simulatorhersteller können auf diese Sprache aufbauen. Modelica wird zur Zeit von freier und kommerzieller Software unterstützt. Im Folgenden wird die Notwendigkeit komplexer Modellbibliotheken erläutert. Freie und kommerzielle Modelica-Bibliotheken werden vorgestellt. Ein Ausblick auf die Zukunft schließt den Beitrag ab.

## 1 Ziele der Bibliotheken

Die Unabhängigkeit eines Modells vom Simulator ist eines der Ziele von Modelica. Modelle sollen sich mit unterschiedlichen Simulatoren rechnen lassen. Dies führt zu einer flexibleren Softwarenutzung und zu zukunftssicheren Modellen. Modelica-Bibliotheken stellen getestete und oft auch komplexe Modellkomponenten bereit. Damit wird das Spezialistenwissen für Anwender auf einfache Weise zugänglich. Die mit diesen Bibliotheken erstellten Modelle sollen mit allen Modelica-Simulatoren identische Ergebnisse liefern. Dies kann erst dann erreicht werden, wenn mehrere Simulatoren Modelica vollumfänglich unterstützen. Daran arbeiten Simulatorhersteller intensiv. AMESim, Dymola, MapleSim, MathModelica, SimulationX sind die kommerziellen Simulatoren, die Modelica unterstützen. Freie Simulatoren sind JModelica, OpenModelica und SCICOS. Die Links zu allen Simulatorherstellern finden Sie ebenfalls auf [1].

Einige Bibliotheken können kostenlos von der Modelica-Homepage geladen werden. Andere Bibliotheken, die Modelle mit sehr viel Spezialwissen zur Verfügung stellen, können über verschiedene Vertriebskanäle erworben werden. Einen guten Überblick finden Sie auch unter [www.modelica.org/ModelicaLibrariesOverview](http://www.modelica.org/ModelicaLibrariesOverview).

## 2 Freie Bibliotheken

Die wichtigste freie Bibliothek ist die Modelica-Standard-Library, die von der Modelica Association entwickelt wurde und laufend an neue Modelica-Versionen angepasst wird. Diese Basisbibliothek enthält mehr als 800 elementare Modellkomponenten und 550 Funktionen aus den Gebieten Regelungstechnik, Mechanik, Elektrik und Elektronik, Thermodynamik und Zustandsautomaten. Eine Bibliothek für Fluidsysteme steht seit Kurzem zur Verfügung. Alle Komponenten stehen als Quellcode zur Verfügung und lassen sich kopieren und ändern. Damit dienen sie auch als ideale Vorlage für eigene Entwicklungen.

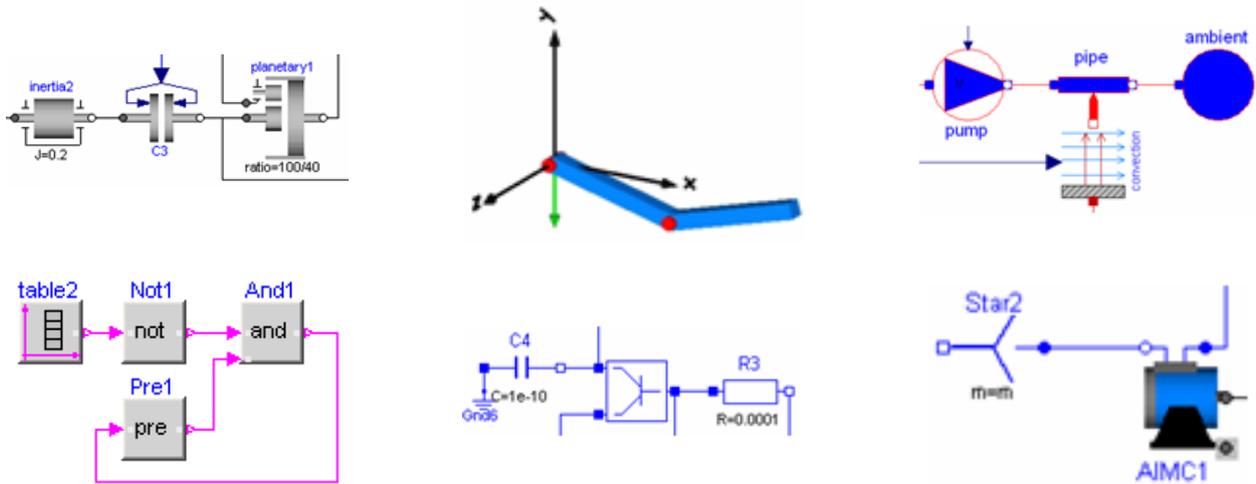


Abbildung 1: Beispiele aus der Modelica-Standard-Library

Die Modelica-Standard-Library läßt sich zur Zeit mit Dymola, SimulationX, MathModelica und OpenModelica nutzen.

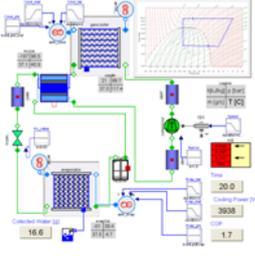
Weitere freie Bibliotheken können ebenfalls von der Modelica-Homepage geladen werden. Diese sind von sehr unterschiedlicher Qualität. Einige können sofort eingesetzt werden, andere werden nicht weiterentwickelt. Sie eignen sich jedoch oft als Vorlage für eigene Entwicklungen.

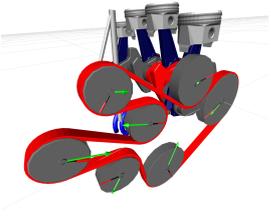
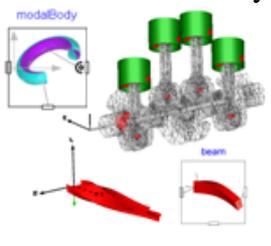
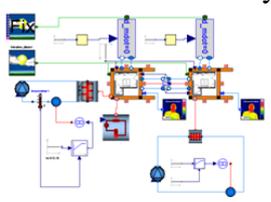
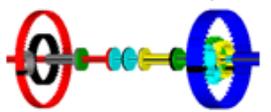
### 3 Kommerzielle Bibliotheken

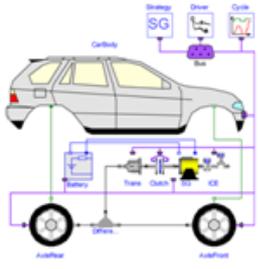
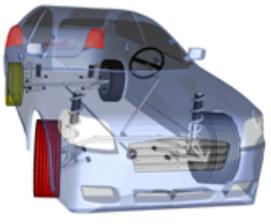
Kommerzielle Bibliotheken werden zur Zeit von mehreren Firmen erstellt, die diese entweder selbst vertreiben oder über Partner anbieten. Viele der Bibliotheken sind zur Zeit nur mit Dymola getestet. Im Lauf des nächsten Jahres werden voraussichtlich auch andere Simulatoren den vollen Modelica-Umfang anbieten, so daß die Bibliotheken dann auch mit diesen Simulatoren lauffähig sein werden.

#### 3.1 Überblick

Folgende kommerzielle Bibliotheken stehen zur Zeit zur Verfügung:

	<p>zur Modellierung von Klimaanlage in Fahrzeugen oder von stationären Klimaanlage und Wärmepumpen.</p> <p>Hersteller: Modelon AB, Schweden</p>
<p>BG_RT Library</p>	<p>einfache Echtzeitsimulation mit Standard-Messdatenerfassungskarten.</p> <p>Hersteller: BAUSCH-GALL GmbH</p>

<p>Belts Library</p> 	<p>eignet sich für die statische und dynamische Simulation von Riementrieben. Zur Modellierung stehen viele angepasste Komponenten wie Scheiben, Riemen, Umschlingungsbögen und vorgefertigte Hebelsysteme zur Verfügung, die der Anwender ohne Einschränkung miteinander kombinieren kann.  Hersteller: Frank Rettig, Vertrieb: BAUSCH-GALL GmbH</p>
<p>CombiPlant Library</p>	<p>Modellierung von kohlegefeuerten Kraftwerken und Kraft-Wärme-Kopplung, enthält z.B. Komponenten für Wärmetauscher, Turbinen, Kompressoren.  Hersteller: Modelon AB, Schweden</p>
<p>FlexibleBodies Library</p> 	<p>erlaubt die modale Beschreibung flexibler Körper. Sie besteht aus dem Teil <b>Beam</b>, der Modelle für Balken enthält, deren flexibles Verhalten vollständig in Modelica beschrieben werden kann und dem Teil <b>ModalBody</b>, mit dem sich allgemeine flexible Körper auf Basis von externen Finite-Element-Modellen beschreiben lassen. Der Preprocessor FEMBS (Simpack von Firma INTEC) erzeugt aus den Finite-Element-Programmen ABAQUS, ANSYS, Nastran, I-DEAS und PERMAS eine SID-Datei, die von der FlexibleBodies Library gelesen wird.  Hersteller: DLR-RM, Vertrieb: BAUSCH-GALL GmbH</p>
<p>FlexBody Library</p>	<p>dient ebenfalls zur Modellierung flexibler Körper. Ausgabe-dateien aus Nastran, Genesis und anderen Finite-Element-Programmen werden gelesen.  Hersteller: Claytex Services Limited, England</p>
<p>HumanComfort Library</p> 	<p>dient zur mathematischen Auswertung des thermischen Komfort-Empfindens innerhalb von klimatisierten Räumen. Diese Modelle können zur Optimierung im Entwicklungsprozeß von Heizungs- und Klimatisierungssystemen im mobilen und stationären Bereich genutzt werden.  Hersteller: XRG Simulation GmbH, Vertrieb: BAUSCH-GALL GmbH</p>
<p>Hydraulics Library</p>	<p>enthält Komponenten zur Modellierung hydraulischer Zylinder, Ventile, Behälter, Pumpen, Motoren und Sensoren.  Hersteller: Modelon AB, Schweden</p>
<p>Pneumatics Library</p>	<p>enthält Komponenten zur Modellierung pneumatischer Zylinder, Ventile, Behälter, Pumpen, Motoren und Sensoren.  Hersteller: Modelon AB, Schweden</p>
<p>PowerTrain Library</p> 	<p>zur vollständigen Modellierung von Antriebssträngen, enthält z.B. Komponenten für Standard- und Planetengetriebe mit Verlusten, Kupplungen mit Reibung, Automatikgetriebe, 3D-Effekte.  Hersteller: DLR-RM, Vertrieb: Dassault Systemes für Dymola, BAUSCH-GALL GmbH für andere Simulatoren</p>

<p>SmartElectricDrives</p> 	<p>dient zur Modellierung geregelter elektrischer Maschinen mit quasi-stationären und transienten Modellen. Damit lassen sich hybride elektrische Fahrzeuge und alternative Antriebskonzepte modellieren. Hersteller: arsenal research, Österreich</p>
<p>VehicleDynamics Library</p> 	<p>zur Modellierung von Fahrdynamik bei PKW und LKW; enthält Komponenten z.B. für Chassis, Radaufhängung, Antriebsstrang, Reifen, Bremsen. Hersteller: Modelon AB, Schweden</p>

### 3.2 Zukunft der Bibliotheken

Eine Vielzahl von Bibliotheken wird zur Zeit entwickelt, z.B. auch im Rahmen des Projekts EURO-SYSLIB [4]. Die Entwicklung, Weiterentwicklung und Wartung anspruchsvoller Modellbibliotheken lohnt sich für Experten nur dann, wenn diese eine entsprechende Verbreitung finden. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit mehrerer Simulatoren, die den vollen Sprachstandard unterstützen. Die Bibliotheken müssen zudem für den Anwender einfach und für einen akzeptablen Preis zuverlässig erhältlich sein. Viele Entwickler vertreiben ihre Bibliotheken selbst oder für Dymola über Dassault Systemes. Die BAUSCH-GALL GmbH baut zur Zeit den Vertrieb von Bibliotheken auf, deren Hersteller den Vertrieb nicht selbst gewährleisten wollen oder können. Wir sehen uns als Schnittstelle zwischen Softwareentwickler und Anwender. Den Bibliotheksentwicklern bieten wir Unterstützung an, um die Bibliotheken marktfähig zu machen. Für die Kunden sind wir ein zuverlässiger Ansprechpartner bei allen Fragen des Erwerbs, der Installation und der Nutzung der Bibliotheken. Nur durch eine effiziente Zusammenarbeit von Simulatorherstellern, Bibliotheksentwicklern und hochwertigem technischen Vertrieb, werden die Bibliotheken erfolgreich sein.

## Literatur

- [1] [www.modelica.org](http://www.modelica.org)
- [2] [www.bausch-gall.de](http://www.bausch-gall.de)
- [3] [www.modelon.de](http://www.modelon.de)
- [4] [www.itea2.org/public/project\\_leaflets/EUROSYSLIB\\_profile\\_oct-07.pdf](http://www.itea2.org/public/project_leaflets/EUROSYSLIB_profile_oct-07.pdf)



## Werkzeuge zur Simulation thermischer Systeme

Martin Loeffler, Martin Schüler und Wilhelm Tegethoff

m.loeffler@tlk-thermo.de

TLK-Thermo GmbH, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig

### Kurzfassung

Die TLK-Thermo GmbH wurde 2003 als Spin-off des Instituts für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig gegründet. Sie bietet Dienstleistungen und Software im Bereich thermischer Systeme an. Der Fokus liegt dabei auf mobilen Anwendungen wie z.B. der Klimatisierung im PKW oder dem Wärmemanagement von Brennstoffzellen. Das Dienstleistungsangebot umfasst Computersimulationen, Messungen, Komponentenauslegungen sowie Beratungen und Schulungen.

Das Team der TLK verfügt über weitreichende Erfahrungen in der Entwicklung von plattformunabhängiger Software. Basierend auf objektorientierten Methoden und unter Verwendung des Qt-Frameworks entwickelt die TLK Software, welche den Anwender bei der Simulation thermischer Systeme unterstützt.

Der Beitrag stellt in knapper Form die von der TLK entwickelten Software-Produkte vor:

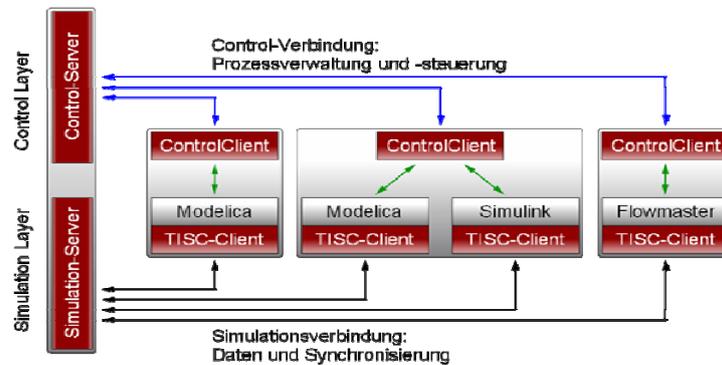
- TISC                      Middleware für die Softwarekopplung
- TIL                        Modelica-Bibliothek für die Simulation von Fluidsystemen
- TILMedia                Stoffdatenschnittstelle für verschiedenste Anwendungen
- StateViewer            Transiente, grafische Darstellung  
                                  von thermodynamischen Zustandsgrößen
- EnergyViewer         Dynamische Darstellung von Mengenflüssen

## 1 TISC

TISC, der TLK Inter Software Connecter, ist eine Co-Simulationsumgebung zur plattformunabhängigen Kopplung von Simulationsprogrammen. Durch die Verfügbarkeit immer leistungsstärkerer Computer besteht bei den Firmen die Möglichkeit, immer größere und komplexere Systeme zu simulieren. Dabei hat sich die Aufteilung der Modelle in kleinere Teil-Modelle nach dem „Teile und Herrsche“-Prinzip bewährt. Auf diese Weise bleibt das System überschau- und in seiner Komplexität beherrschbar. Die einzelnen Teilmodelle können optimal auf mehrere Rechner verteilt ausgeführt werden, wodurch auch eine Parallelisierung und somit Beschleunigung der Simulation erreicht wird.

Durch die Kopplung von Simulationsprogrammen aus den unterschiedlichsten Domänen kann für ein Teilsystem das jeweils optimale Simulationsprogramm ausgewählt werden. Ebenso kann auf langjährige Erfahrungen der einzelnen Abteilungen mit Ihren bevorzugten Simulatoren zurückgegriffen werden.

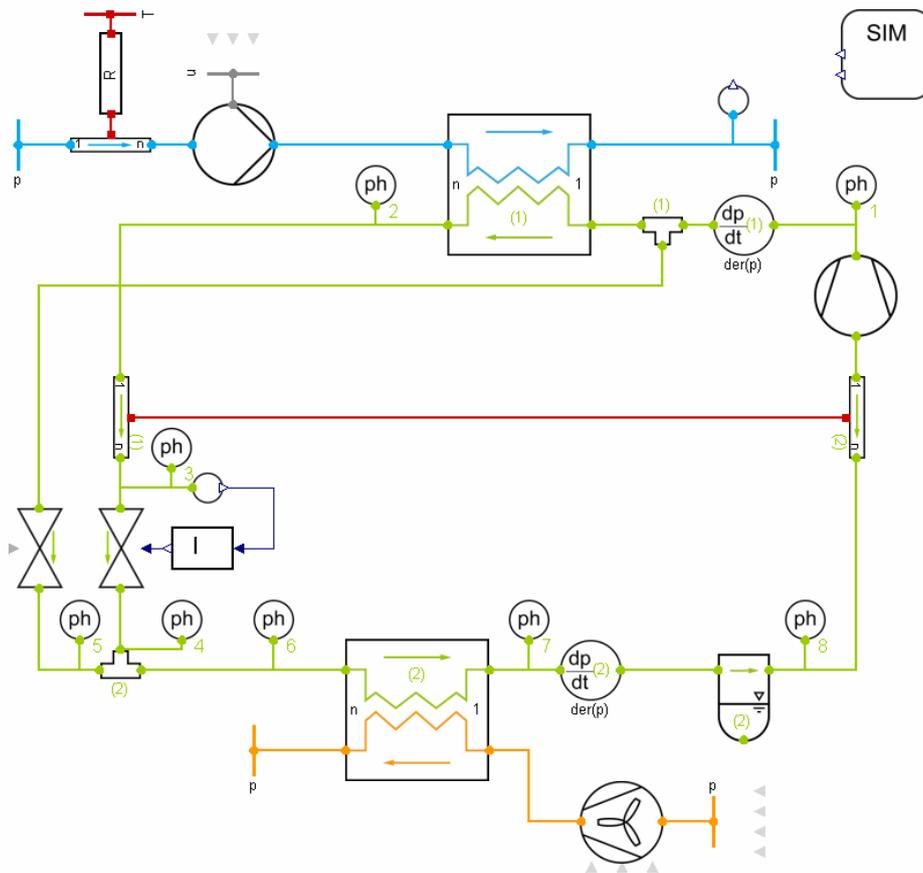
Das TISC-Center, die zentrale Einheit zur Durchführung einer verteilten Simulation, übernimmt das Anstarten der einzelnen Modelle auf den unterschiedlichen Computern sowie den Datenaustausch und die Synchronisation der beteiligten Programme. Außerdem hilft das TISC-Center bei der Organisation, der Parametrisierung und Initialisierung der Modelle. Für Parametervariationen steht ein Batch-Modus zur Verfügung und die Simulation kann mittels Plots, Datentabellen und anderen Anzeigeinstrumenten jederzeit analysiert und ausgewertet werden. TISC unterstützt aktuell Programme wie MATLAB/Simulink, Dymola, KULI, Flowmaster, Fluent, SimulationX, LabVIEW, ASCET, Star-CD, CFX, OpenFOAM, TRNSYS, THESEUS-FE. Die Schnittstellenliste wird laufend erweitert. Außerdem existiert ein Gateway zur Anbindung an den CAN-Bus.



**Bild 1:** Layerkonzept der TISC Co-Simulationsumgebung.

## 2 TIL

TIL, die TLK-I<sub>FT</sub>-Library, wurde zusammen mit dem Institut für Thermodynamik der TU Braunschweig entwickelt. Es handelt sich um eine Modelica-Bibliothek zur Simulation von stationären und transienten Fluidsystemen wie z.B. Wärmepumpen, Klimageräten, kältetechnische Anlagen und Kühlkreisläufen. TIL nutzt die objektorientierte Modelica-Bibliothek TILMedia zur Berechnung der Stoffdaten mittels Refprop oder anderer Datenbanken.

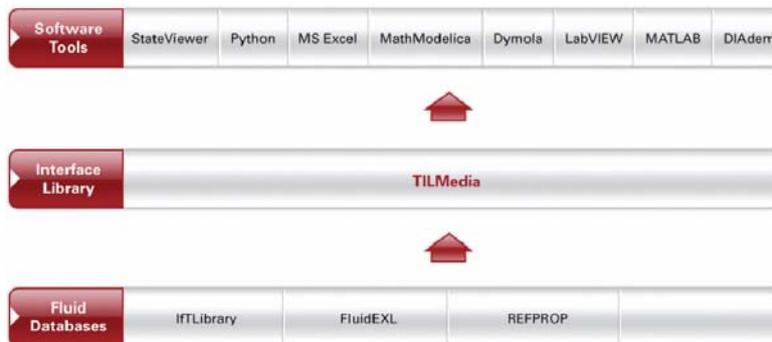


**Bild 2:** Beispiel eines Kreislaufs unter TIL.

TIL enthält eine Komponentenbibliothek für Kompressoren, Wärmetauscher, Rohre, Kältemittelspeicher, Ventile und Luftkanäle. Des Weiteren ist eine umfassende Sammlung von Modellen für Wärmeübergang- und Druckabfallbeziehungen implementiert. Ein grafisches User-Interface vereinfacht die Parametrisierung sowie Simulationskontrolle und hilft beim Auswerten der Simulationsergebnisse. TIL ist in der frei verfügbaren Modellierungssprache Modelica umgesetzt und kann aufgrund seiner objektorientierten Struktur jederzeit einfach erweitert werden.

### 3 TILMedia

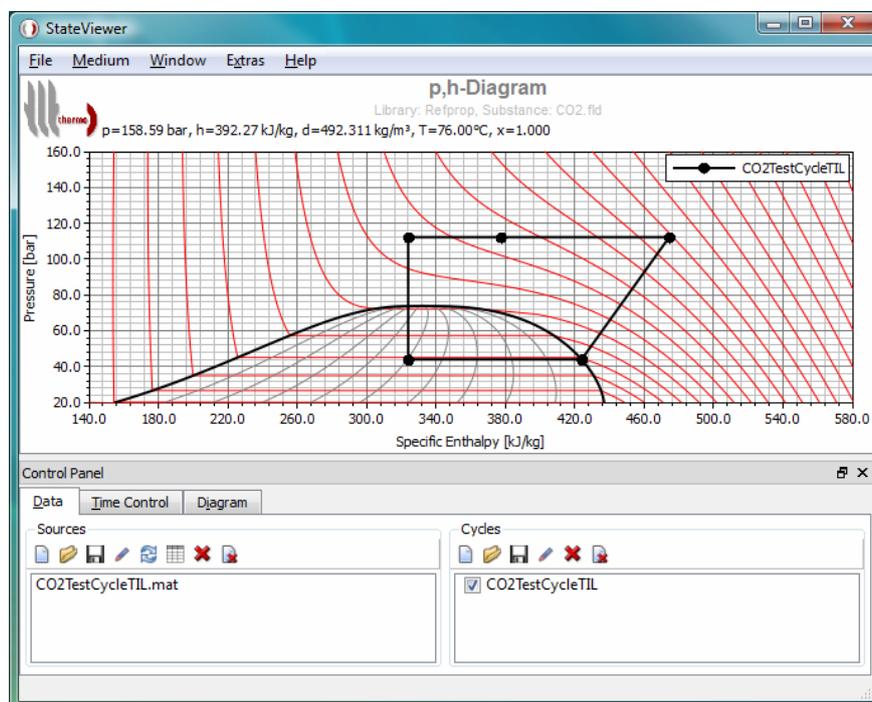
TILMedia ist eine Bibliothek für die Berechnung von Stoffeigenschaften für Kältemittel, Flüssigkeiten, Gase und Festkörper. Die Stoffdaten können aus verschiedenen Anwendungen und Programmiersprachen heraus angesprochen werden. Unterstützt werden momentan MS Excel, Dymola, SimulationX, MathModelica, OpenModelica, MATLAB, Simulink, StateVierer, LabVIEW, DIAdem, Python und C/C++.



**Bild 3:** Aufbau TILMedia.

## 4 StateViewer

Der StateViewer ist ein Werkzeug zur Visualisierung von transienten Mess- und Simulationsdaten der Thermodynamik. Bereits während einer laufenden Messung können Daten online angesehen und kommentiert werden. Nach der Simulation besteht die Option, sich mittels eines Html-Exports eine Dokumentation über die durchgeführte Messung erstellen zu lassen.



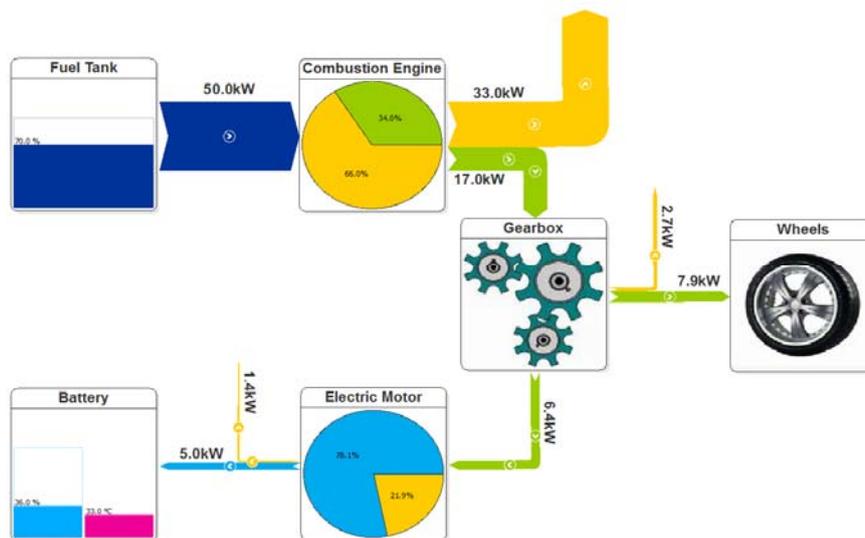
**Bild 4:** Visualisierung eines Kältekreislaufs mit dem StateViewer.

Durch die Anbindung an TILMedia kann auf weltweit anerkannte Stoffdaten zugegriffen werden. Es stehen verschiedene Arten von Diagrammen zur Verfügung (z.B. ph, Ts, Th). Basierend auf dem aktuellen Zustand eines Kältekreislaufs werden weitere Informationen (z.B. Randbedingungen) in einem separaten Fenster angezeigt. Neben dem Online-Modus steht auch eine Importfunktion für Simulationsdaten aus verschiedenen Offline-Quellen zur Verfügung. Für die Präsentation von Simulationsdaten können die Diagramme in Form von Grafiken und Videosequenzen exportiert werden.

## 5 EnergyViewer

Der EnergyViewer ist ein Werkzeug zur dynamischen, grafischen Darstellung von Mengenflüssen. Für Mess- und Simulationsdaten können grafische Strukturen angelegt und Datenquellen zugeordnet werden. Die Daten für die Flussgrößen können entweder online über TISC bezogen oder aus einer Datei importiert werden. Durch die Anbindung an TISC können z.B. die Programme MATLAB/Simulink, Dymola, SimulationX, ASCET, OpenModelica, Flowmaster, Fluent, KULI etc. angebunden werden.

Die Visualisierung der Flüsse unterstützt den Anwender dabei, ein besseres Verständnis über das Systemverhalten zu erlangen. Dadurch können Fehler früher erkannt und die Simulationsdaten effektiver analysiert und validiert werden.



**Bild 5:** Beispielhafte Systemdarstellung eines Hybridfahrzeugs mit dem EnergyViewer.

## Autorenverzeichnis

- Al-Mansi, A. 490  
Asadzadeh, M. 470  
Atri, A. 103, 156
- Bachmann, A. 140  
Bäker, B. 338  
Barth, A. 263  
Bausch-Gall, I. 563  
Becker, P. 396  
Behrens, M. 131  
Besau, G. 379  
Blankenburg, R. 504  
Blume, B. 202, 464  
Bräuer, A. 449, 525  
Bräuer, D. 58  
Breitenecker, F. 95, 119, 156, 170, 176, 186, 415  
Bruckner, M. 423, 556  
Bruns, F.-W. 20  
Bruzzone, A. G. 1  
Büskens, C. 202, 464
- Cerrato, C. 1  
Creutz, S. 544
- Dach, T. 540  
Dammers, D. 28  
Diaconescu, M. 294  
Dobler, M. 393  
Dovi, V. G. 1  
Downes, N. 533  
Doynov, N. 318
- Einzinger, P. 170, 176  
Emrich, S. 415, 423  
Endel, G. 186  
Engell, S. 131  
Esmaeili erami, S. 553
- Fazekas, M. 119  
Feldmann, L. 147  
Fongwa, E. 294  
Frick, R. 332
- Gerlach, G. 544  
Giroud, M. 28  
Gnauck, A. 294, 511, 519  
Gräber, M. 439  
Gräber, P.-W. 504  
Gruber, M. 225  
Gyger, T. 286  
Gyimesi, M. 44, 119, 170, 176
- Hasenschwanz, W. 235  
Hess, S. 110  
Hesselbach, J. 263, 271, 278  
Himstedt, K. 404  
Hohmann, R. 369  
Holbein, L. 80
- Islam, S. N. 475
- Jäkel, F.-W. 36  
Jessen, U. 210  
Junge, M. 256  
Junghanns, R. 504
- Kantor, V. 162  
Klatt, M. 431  
Kleiza, K. 20  
Klug, M. 72  
Körner, A. 87, 95  
Köster, F. 346  
Krautz, H. J. 431  
Krug, W. 511, 519  
Kuszapski, A. M. 324  
Kunde, M. 140  
Kutter, S. 338
- Lamek, B. 544  
Lang, B. 271  
Langhammer, S. 338  
Litz, M. 140  
Loeffler, M. 439, 567  
Lorenz, T. 346  
Lunde, K. 385  
Luther, B. 511, 519
- Maniu, L. A. 324, 562  
Martin, L. 256  
Mast, F. 385  
Maurer, W. 362  
Mayerhofer, J. 44  
Merzlikina, E. 457  
Mesić, S. 415, 423  
Michailov, V. 318  
Miksch, F. 170, 186  
Mirciov, S. 256  
Misera, S. 50  
Möller, D. P.F. 396, 404  
Moon, K. 533  
Müller, C. 500  
Müller, T. 396  
Müller-Sommer, H. 353

Nagele, N. 103, 156  
 Nicolae, O. 294, 304  
 Nimtz, M. 431  
 Noack, C. 162  
 Noche, B. 490  
  
 Pawletta, T. 7,  
 Popper, N. 103, 170, 186, 415, 423, 556  
  
 Rabe, M. 36  
 Rahe, D. 449  
 Rehkopf, A. 58, 500, 540  
 Reinhart, G. 286  
 Resch, M. 147  
 Richter, A. 346  
 Riverberi, A. P. 1  
 Rujner, H. 533  
  
 Sadeghi, N. 484, 487  
 Saler, M. 218, 225, 393  
 Schiller-Frühwirth, I. 186  
 Schmidmeier, R. 256  
 Schneckenreither, G. 87  
 Schneider, B. 63  
 Schnittert, S. 70  
 Schöbel, A. 379  
 Schollän, D. 28  
 Schubert, F. 192, 544  
 Schüler, M. 439, 567  
 Schulze, C. 439  
 Schwatinski, T. 7  
 Shakiba, S. 126  
 Shakouri, H. 126, 470, 484, 487, 553  
 Siegfried, R. 63  
 Siemon, A. 80  
 Spahn, U. 312  
 Speckle, M. 225  
 Spitzner, S. 324, 562  
 Stapelfeld, C. 318  
 Storch, H. 525, 533  
 Strassburger, S. 353  
 Stulgies, N. 439  
 Svyatnyy, V. 147  
  
 Tauböck, S. M. 415, 423  
 Tegethoff, W. 439, 567  
 Teucher, V. 449, 525  
 Thees, M. 210  
 Thinh, N. X. 449, 525  
 Thurnher, P. 218, 393  
 Tissafi Drissi, F. 28  
 Tuna, D. 379  
  
 Urach, C. 186  
  
 Vierhaus, H. T. 50  
 Voit, F. 13  
 von Lieres, E. 70  
 Voßkämper, L. M. 28  
  
 Wagner, G. 9, 162, 294, 304  
 Wardijono, B. A. 80  
 Wassel, D. 464  
 Wastian, M. 119  
 Wei, S. 475  
 Weinaug, H. 36  
 Weishaar, N. 278  
 Wenzel, S. 210  
 Werner, J. 304  
 Wiegand, D. 415, 423  
 Winz, R. 70  
 Wittmann, J. 110, 396, 404  
 Wloka, D. 80  
  
 Yoo, Y.-H. 20  
  
 Zauner, G. 87, 176, 186  
 Zeitz, M. 147  
 Zierl, D. 379  
 Zimmermann, A. 44, 95