Komponentenbasierte Unterstützung von Methoden der Modellbildung und Simulation im Einsatzkontext des betrieblichen Umweltschutzes

Konzeption und prototypische Entwicklung eines Stoffstromsimulators zur Integration einer stoffstromorientierten Perspektive in die auftragsbezogene Simulationssicht

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
am Fachbereich Informatik
der Universität Hamburg

vorgelegt von

Volker Wohlgemuth

Hamburg, März 2005

Fachbereich Informatik
Universität Hamburg
Tag der Disputation: 29.06.2005

Email des Autors:
wohlgemuth@informatik.uni-hamburg.de
Volker.Wohlgemuth@fhtw-berlin.de
VolkerWohlgemuth@web.de

Berichte aus der Umweltinformatik

Volker Wohlgemuth

Komponentenbasierte Unterstützung von Methoden der Modellbildung und Simulation im Einsatzkontext des betrieblichen Umweltschutzes

Konzeption und prototypische Entwicklung eines Stoffstromsimulators zur Integration einer stoffstromorientierten Perspektive in die auftragsbezogene Simulationssicht

Shaker Verlag
Aachen 2005

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

Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4383-6
ISSN 1616-0886

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept entwickelt und prototypisch realisiert, welches das Weltbild der ereignis-diskreten Simulation mit der stoffstromorientierten Perspektive des betrieblichen Umweltschutzes komponentenbasiert verknüpft. Die ereignis-diskrete Simulation sowie die Betrachtung der mit den betrieblichen Aktivitäten verbundenen Stoff- und Energieströme, z.B. im Rahmen des Stoffstrommanagements, stellen hohe Anforderungen an die beteiligten Personen und werden jeweils von spezialisierten Softwarewerkzeugen unterstützt. Beide Ansätze haben unterschiedliche Ursprünge und werden bisher eher getrennt voneinander eingesetzt. Sie betrachten aber prinzipiell die gleichen Produktionsprozesse unter verschiedenen Blickwinkeln, was regelmäßig zur Entwicklung von jeweils einem Computermodell für die Abbildung der jeweiligen Perspektive führt. Somit waren bisher zwei Modelle notwendig, die mithilfe zweier verschiedener Softwarewerkzeuge bearbeitet werden mussten, um Simulationsstudien und stoffliche Betrachtungen für einen bestimmten Produktionsprozess durchzuführen. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept und seine prototypische Umsetzung ermöglicht eine Integration dieser beiden Ansätze basierend auf einem Modell in einer Softwareumgebung. Dadurch wird der Aufwand verringert, der nötig ist, um eine kombinierte Analyse marktorientierter, betriebsorientierter und stofflicher Fragestellungen durchzuführen, und es wird eine engere Verzahnung von Ökologie und Ökonomie erreicht. Zum Verständnis der entwickelten Konzeption werden in dieser Arbeit die grundlegenden Begriffe, Methoden, Softwarewerkzeuge und Vorgehensweisen der Modellbildung und Simulation sowie des betrieblichen Umweltschutzes dargestellt und auf dieser Basis die Vorteilhaftigkeit einer Verknüpfung beider Ansätze beschrieben. Es erfolgt außerdem ein systemtheoretischer Blick auf den Betrieb und seine Produktionsprozesse, um unter Modellbildungsaspekten typische Modellelemente zu identifizieren, die als Softwarekomponenten im konzipierten Stoffstromsimulator zum Einsatz kommen. Einen weiteren Aspekt dieser Arbeit stellt nämlich die kompositorische Plug-and-Play-artige Verwendung von Softwarekomponenten dar, auf deren Basis die Kombination von Simulationsfunktionen und Funktionen zur Unterstützung der stofflichen Betrachtungsweise realisiert wurde. Durch die Komposition entsprechender Fachkomponenten ist in dieser Arbeit eine Art spezielles betriebliches Umweltinformationssystem (der Stoffstromsimulator) entstanden, das sich auf die Durchführung von ereignisorientierten, diskreten Stoffstromsimulationen konzentriert. Gleichzeitig stellt der Stoffstromsimulator eine Art spezielles Komponenten-Anwendungs-Framework für die stoffstrombasierte Simulation dar, das die notwendigen Schnittstellen definiert, die von Plugin-Komponenten realisiert werden müssen, um innerhalb des Stoffstromsimulators benutzt werden zu können. Sowohl die Entwicklung als auch die Verwendung entsprechender Komponenten innerhalb des Stoffstromsimulators werden innerhalb dieser Arbeit anhand eines Beispiels aus der Halbleiterindustrie demonstriert. Anhand dieses Praxisbeispiels, bei dem der Stoffstromsimulator im Rahmen einer Investitionsentscheidung eingesetzt wurde, werden außerdem die Vorteile der Verwendung der Simulationstechnik im Rahmen des betrieblichen Umweltschutzes verdeutlicht.

Abstract

Within the scope of this thesis a concept is developed and implemented as a prototype that combines the worldview of discrete event simulation with the material flow oriented perspective of industrial environmental protection. Discrete event simulation as well as the examination of material flows that are caused by the activities of a company, for instance within the scope of a material flow analysis, require profound knowledge of all persons involved and are assisted by specialized software tools. Both approaches have different roots and are normally used independently of each other. However, in principle they analyse the same production processes under a different perspective, which regularly leads to the development of a computer model for each perspective respectively. Thus, two models, which are handled in two different software tools, are needed to perform simulation studies and material flow analysis of a certain production process. The concept and its implementation, presented in this thesis, allow an integrated view on both approaches based on one model in the same software environment. Thus, this approach reduces the effort that is needed to offer a combined analysis of market oriented, company related and material flow associated questions and allows a closer connection of environmental and economic aspects. For the understanding of the developed concept this work will also describe the basic terms, methods, software tools and approaches of the modelling and simulation technique and will also present basic instruments and ideas in the field of industrial environmental protection. Based on this description the benefits are presented that result from an integrated view of both approaches. Furthermore, a company and its processes are examined from a system-theoretic view to identify typical elements that are needed for modelling purposes. These modelling elements are used as a template to develop software components that can be integrated into the material flow simulation system, which is designed and developed within this thesis. In addition, this thesis deals with the aspect of the usage of such software components in a plug-and-play fashion. Based on these software components the integration of simulation and material flow functionality is achieved. Thus, a special kind of industrial environmental information system is formed by the composition of these specialized software components, which focuses on performing simulation runs that concentrate on material flow aspects. In this way, the material flow simulation system forms a specialized component application framework, which defines all necessary interfaces that have to be used by software components that want to become a part of the material flow simulation system as a plugin. The development and usage of such software components will be demonstrated by means of an application of the developed software system within a semiconductor production plant. Finally, based on this practical example, where the material flow simulation system is used for investment decision-making, the advantages of the application of discrete event simulation for industrial environmental protection purposes will be worked out.

Vorwort

Die vorliegende Monographie von Dr. Volker Wohlgemuth entstand als Dissertation im Rahmen langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Arbeitsbereich Angewandte und Sozialorientierte Informatik (ASI) des Fachbereichs Informatik an der Universität Hamburg auf dem Gebiet der Umweltinformatik, die bei uns bereits eine mehr als 20-jährige Tradition besitzt. Von hier sind schon sehr früh erste Impulse für diese noch sehr junge Anwendungsdisziplin der Informatik ausgegangen, die von einem neu gegründeten Fachausschuss der Gesellschaft für Informatik (GI) frühzeitig aufgegriffen wurden und sich bundesweit im Rahmen von inzwischen etablierten turnusmäßigen Fachtagungen und Workshops kontinuierlich weiter entwickelt und ausgeweitet haben. Damals wie heute bestand das Ziel, mit innovativen anwendungsnahen Techniken und Methoden der Informatik einen Beitrag zur Bewältigung der Umwelt- und Ressourcenprobleme zu leisten, und dies auch zunehmend auf internationaler Ebene.

Als besondere Spezialisierung der Umweltinformatik hat sich in der letzten Dekade die Betriebliche Umweltinformatik mit engen Beziehungen zur Wirtschaftsinformatik heraus kristallisiert, die im hiesigen Arbeitsbereich ebenfalls schon sehr früh aufgegriffen wurde. Besondere Beachtung haben dabei die gemeinsamen Arbeiten der Kollegen Prof. Dr. Andreas Möller, inzwischen am Fachbereich Umweltwissenschaften der Universität Lüneburg, und Prof. Dr. Arno Rolf gefunden, die bereits in den frühen neunziger Jahre die bekannte Methode der Stoffstromnetze für die Ökobilanzierung eingeführt haben. Vor diesem fachlichen Hintergrund und auf der Basis vielfältiger wissenschaftlicher Aktivitäten und Softwareentwicklungen zur Simulationstechnik, einem weiteren Arbeitsschwerpunkt im Arbeitsbereich ASI, entstand die vorliegende Forschungsarbeit von Dr. Volker Wohlgemuth, und zwar an der Schnittstelle zwischen Simulationstechnik, Stoffstromanalyse und komponentenorientierter Softwaretechnik. Es geht bei dem Ansatz im Kern um die sowohl wissenschaftlich als auch für die Anwendungspraxis relevante Fragestellung der Verknüpfung klassischer ereignis-diskreter Simulationsverfahren, beispielsweise zur Modellierung von betrieblichen Abläufen in Produktion oder Logistik, mit den neueren Ansätzen der Stoffstromnetze zur Abschätzung von Stoff- und Energiebilanzen, wiederum für (die gleichen) Produktions- bzw. Logistikprozesse. Im Mittelpunkt steht folglich ein methodischer Ansatz zur Integration der vorrangig betriebswirtschaftlichen Sichtweise in der Simulation mit einer ökologischen, stoffstromzentrierten Sicht auf diese Prozesse.

Das Ziel des Autos war die Konzeption und Implementierung eines neuartigen „Stoffstromsimulators“. Darüber hinaus hat der Autor den Anspruch, seinen innovativen konzeptionellen Ansatz in das noch relativ junge und noch nicht vollständig strukturierte Spezialgebiet der Betrieblichen Umweltinformatik angemessen einzubetten. Da zu diesem Bereich bisher wenig systematisierende Gesamtdarstellungen in der Literatur zu finden sind, kann die vorliegende Monographie hier einen weiteren wertvollen Beitrag leisten. Ich bin davon überzeugt, dass diese sehr interessante, breit gefächerte und gut lesbare Monographie die aktuelle wissenschaftliche Diskussion in der Betrieblichen Umweltinformatik außerordentlich befruchten wird.

Hamburg, im Juli 2005

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Page

Fachbereich Informatik der Universität Hamburg

Vorwort des Autors

Diese Arbeit setzt die nunmehr seit ca. 20 Jahren am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg bestehenden Bemühungen fort, den Umweltschutz als ein Thema der Angewandten Informatik zu betrachten. Sie steht in guter Tradition mit einer ganzen Reihe am Fachbereich Informatik entstandener Dissertationen und Diplomarbeiten, welche Methoden der Informatik in unterschiedlichen Kontexten für umweltrelevante Fragestellungen einsetzen, um einen Beitrag der Informatik zur Überwindung derzeitiger und zukünftiger Umweltprobleme zu leisten. Die bisher am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg im Kontext des Umweltschutzes verwendeten Informatikmethoden und -konzepte beziehen sich auf die Bereiche der diskreten und kontinuierlichen Simulation, (wissensbasierter) Modellierungs- und Simulationswerkzeuge, Umweltinformationssysteme und Stoffstromnetze. Insbesondere haben mich die von Andreas Möller und Arno Rolf entwickelten Stoffstromnetze dazu angeregt, die von diesen vorgenommene modellhafte Abbildung umweltrelevanter Stoff- und Energieströme mit der ereignis-diskreten Simulation zu „verheiraten“. Dabei handelt es sich jedoch um eine „Hochzeit“ zweier anspruchsvoller Partner, die jede für sich gesehen bereits von großer Komplexität und hohen Anforderungen an die Kenntnisse der beteiligten Personen gekennzeichnet sind. Eine angemessene Unterstützung dieser Vermählung durch eine entsprechend geeignete Software stellt daher eine hohe Anforderung für eine Arbeit aus der Angewandten Informatik dar. Der im Rahmen dieser Arbeit konsequent beschrittene komponentenorientierte Weg versucht, eine möglichst effektive Wiederverwendung bestehender Softwarekomponenten aus den genannten Bereichen zu gewährleisten und den Aufwand für die Durchführung einer auf beiden Ansätzen beruhenden gemeinsamen Simulationsstudie zu reduzieren.

Diese Arbeit entstand während meiner fast achtjährigen Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Angewandte und Sozialorientierte Informatik des Fachbereichs Informatik in den Jahren 1997 bis 2005. Dieser Arbeitsbereich kann als eine der Keimzellen der Umweltinformatik in Deutschland betrachtet werden und bot mir ein kreatives Umfeld für die Entwicklung der in dieser Arbeit manifestierten Konzepte und deren Umsetzung in ein Softwaresystem, das zu meiner Freude bereits in der Praxis bei einem Halbleiterhersteller eingesetzt wird. Den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Arbeitsbereichs im Speziellen sowie des Fachbereichs im Allgemeinen gebührt deshalb mein Dank für die freundliche und kooperative Arbeitsatmosphäre. Namentlich bedanken möchte ich mich zunächst bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Bernd Page, der mir einen sehr großen Gestaltungsfreiraum bei der Konzeption und Entwicklung dieser Arbeit eingeräumt hat, mir jedoch auch jederzeit mit Ratschlägen zur Seite stand. Er half mir auch mit manch aufmunternden Worten über schwierige Zeiten hinweg und gestattete es mir, mein Dissertationsprojekt recht frühzeitig in die Lehre mit einzubinden. Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Arno Rolf, über den ich vor 10 Jahren den Weg zur Umweltinformatik fand. Meiner Kollegin Ruth Meyer und meinen heutigen und ehemaligen Kollegen Dr. Ralf Bachmann, Dr. Björn Gehlsen, Dr. Manuel Gottschick, Nikolas Knaack, Dr. Andreas Möller, Holger Mügge, Dr. Christian Reick und Hartmut Obendorf danke ich für die angenehme und freundliche Zusammenarbeit. Den Herren Prof. Dr. Michael Sonnenschein vom Department Informatik der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg und Prof. Dr.-Ing. Dietmar P. F. Möller vom Arbeitsbereich Technische Informatiksysteme des Fachbereichs Informatik der Universität Hamburg danke ich für die Bereitschaft, die Begutachtung der Dissertation zu übernehmen.

Bedanken möchte ich mich auch bei den zahlreichen Studierenden, die in vielfältiger Weise zu der Implementierung der entstandenen Software in unterschiedlich großem Umfang einen Beitrag geleistet haben. Ohne ihre Implementierungstätigkeiten wäre die entstandene Software niemals soweit gewachsen, dass sie in der Praxis hätte eingesetzt werden können. Zu verdanken ist dieser Erfolg auch der frühzeitigen Einbindung des Dissertationsprojekts in die Lehre, was zu einem sehr fruchtbaren Arbeitsklima führte, von dem sowohl die Studierenden als auch ich profitieren konnten. So haben hier viele Studierende erste Erfahrungen innerhalb eines größeren Softwareprojektes sammeln können. Mir hat die Zusammenarbeit mit ihnen viel Freude bereitet, wenngleich sich der Arbeitsaufwand für mich durch diese intensive Zusammenarbeit etwas erhöht hat. Namentlich möchte ich mich bei Linda Bruns, Jonas Bünger, Oxana Gromyko, Julia Hagemeister, Jan Heffter, Lina Heydt, Oliver Kempe, Nicole Küstner, Matthias Mäusbacher, Stefan Müller, Christoph Niebuhr, Tobias Schnackenbeck und Jörn Zietz für die vielen kreativen Diskussionen bedanken.

Mein Dank gilt auch den Kollegen der ifu Hamburg GmbH, für die ich zur gleichen Zeit viele Jahre lang als Softwareentwickler und Berater auf dem Gebiet des Stoffstrommanagements tätig war. Durch die hier in der Praxis gewonnenen Erfahrungen und Anregungen konnte ich meine theoretischen Überlegungen anhand praktischer Anwendungsfälle sehr gut validieren und umgekehrt Anforderungen aus der Praxis in den theoretischen Unterbau dieser Arbeit mit einfließen lassen. Insbesondere für die Bereitstellung von Komponenten zur Anbindung an das BUIS UMBERTO gebührt ihnen mein Dank.

Dankbar bin ich ferner Herrn Dipl.-Ing. Peter Staudt-Fischbach, der auf der Seite der Vishay Semiconductor Itzehoe GmbH den Einsatz des Stoffstromsimulators unermüdlich unterstützt hat. Von ihm wurden außerdem viele Anregungen zur Verbesserung der praktischen Handhabbarkeit der Software formuliert.

Schließlich möchte ich mich auch noch bei Alexander Danek, Andreas Fritzsche, Andrea Heffner, Tobias Schnackenbeck und Jörn Zietz bedanken, die mir als sorgfältige Korrekturleser eine wichtige Hilfe waren. Zu größtem Dank bin ich allerdings meinen Eltern und meinem Bruder verpflichtet, die es mir durch ihre langjährige Unterstützung erst ermöglicht haben, meine Dissertation zu einem erfolgreichen Abschluss zu bringen.

Hamburg, im Juli 2005

Volker Wohlgemuth

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis ..... **XIII**

Abbildungsverzeichnis ..... **XV**

Tabellenverzeichnis ..... **XXI**

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung 1

1.2 Zielsetzung, Leitbild und Anwendungsszenarien 3

1.3 Vorgehensweise 7

2 Methodische Aspekte der Modellbildung und Simulation **9**

2.1 Grundbegriffe der Modellbildung und Simulation 9

2.1.1 System 10

2.1.2 Modell 13

2.1.3 Experiment 18

2.1.4 Simulation 21

2.1.5 Optimierung 24

2.2 Modellbildung und Simulation als Prozess 27

2.2.1 Basismodell 28

2.2.2 Ablaufmodell 30

2.2.3 Ebenenmodell 35

2.3 Potenziale, Probleme und Fallstricke des Verfahrens der Modellbildung und Simulation 37

2.3.1 Potenzial 37

2.3.2 Probleme 39

2.3.3 Fallstricke 41

2.4 Komponenten im Prozess der Modellbildung und Simulation 44

2.4.1 Komponenten 44

2.4.2 Komponentenrahmenwerke 49

2.4.3 Komponenten innerhalb des Prozesses der Modellbildung und Simulation 53

2.5 Zusammenfassung 57

3 Modellbildung und Simulation im Betrieb ... 59
3.1 Der Betrieb aus systemtheoretischer Sicht ... 59
3.1.1 Definition Betrieb ... 59
3.1.2 Der Betrieb als System ... 60
3.2 Zielsetzung für den betrieblichen Einsatz der Modellbildung und Simulation ... 64
3.2.1 Eingrenzung ... 64
3.2.2 Einsatzfelder und Zielsetzung ... 65
3.3 Der Betrieb als Objekt der Modellbildung und Simulation ... 72
3.3.1 Modellrelevante Teilsysteme eines Betriebes ... 72
3.3.2 Typische Modellelemente ... 73
3.3.3 Modellsteuerungsmechanismen ... 76
3.4 Simulationswerkzeuge und -konzepte ... 78
3.4.1 Anforderungen an Simulationswerkzeuge ... 79
3.4.2 Klassifikation von Simulationswerkzeugen ... 85
3.4.3 Beispiele für Simulationswerkzeuge ... 93
3.5 Beispielhafte Vorgehensweise einer Simulationsstudie im Betrieb ... 98
3.5.1 Erkenntnisobjekt und Zielsetzung ... 98
3.5.2 Projektorganisation ... 101
3.5.3 Datenerhebung und Modellentwicklung ... 102
3.5.4 Modellimplementierung ... 103
3.5.5 Modellvalidierung und Durchführung von Simulationsexperimenten ... 105
3.5.6 Ergebnisse ... 105
3.6 Zusammenfassung ... 107

4 Betrieblicher Umweltschutz ... 109
4.1 Definition und Zielsetzung des betrieblichen Umweltschutzes ... 109
4.1.1 Motivation des betrieblichen Umweltschutzes ... 110
4.1.2 Definition betrieblicher Umweltschutz ... 112
4.1.3 Zielsetzung des betrieblichen Umweltschutzes ... 115
4.1.4 Einordnung in das betriebliche Zielsystem ... 116
4.2 Instrumente und Methoden des betrieblichen Umweltschutzes ... 119
4.2.1 Instrumente zur Erfassung betrieblicher Umweltauswirkungen ... 119
4.2.2 Instrumente zur Bewertung betrieblicher Umweltauswirkungen ... 123
4.2.3 Instrumente des betrieblichen Umweltschutzes ... 133

4.3 Betriebliche Umweltinformationssysteme ... 142
4.3.1 Definition und Aufgaben betrieblicher Umweltinformationssysteme ... 143
4.3.2 Anforderungen an betriebliche Umweltinformationssysteme ... 145
4.3.3 Klassifikation von betrieblichen Umweltinformationssystemen ... 150
4.3.4 Beispiele für betriebliche Umweltinformationswerkzeuge ... 153
4.4 Beispielhafte Vorgehensweise einer computergestützten Stoffstromanalyse im Betrieb ... 158
4.4.1 Untersuchungsrahmen und Zielsetzung ... 158
4.4.2 Stoffstromanalyse ... 161
4.4.3 Bewertung und Wirkungsabschätzung ... 163
4.4.4 Auswertung ... 164
4.5 Zusammenfassung ... 165

5 Methoden der Modellbildung und Simulation im Einsatzkontext des betrieblichen Umweltschutzes ... 169
5.1 Motivation ... 169
5.1.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede ... 171
5.1.2 Thesen zum Simulationseinsatz im betrieblichen Umweltschutz ... 174
5.2 Bestehende Ansätze ... 177
5.2.1 Ansätze zur diskreten Simulation ... 178
5.2.2 Ansätze zur kontinuierlichen Simulation ... 181
5.2.3 Andere artverwandte Ansätze ... 183
5.3 Schlussfolgerungen ... 191

6 Konzeption und Implementierung eines komponentenbasierten Stoffstromsimulators ... 197
6.1 Zielsetzung und Anforderungen ... 197
6.1.1 Zielsetzung ... 197
6.1.2 Anforderungen ... 199
6.2 Grundzüge der Konzeption ... 203
6.2.1 Grundlegende Architektur ... 204
6.2.2 Modellerstellung ... 212
6.2.3 Durchführung von Simulationsexperimenten ... 214
6.2.4 Ergebnisauswertung ... 217
6.2.5 Verbindung der auftragsorientierten mit der stoffstromorientierten Sichtweise ... 218

6.2.6 Benutzerrollen ... 227
6.3 Technische Grundlagen ... 228
6.3.1 Auswahl der Programmiersprache und Komponentenarchitektur ... 228
6.3.2 Überblick über die COM-Technologie ... 229
6.4 Grundzüge der Implementierung ... 234
6.4.1 Rahmenanwendung ... 236
6.4.2 Modellerstellung ... 245
6.4.3 Durchführung von Simulationsexperimenten ... 250
6.4.4 Ergebnisauswertung ... 260
6.4.5 Verbindung der auftragsorientierten mit der stoffstromorientierten Sichtweise ... 264

7 Anwendungsbeispiel in der Halbleiterindustrie ... 277
7.1 Zielsetzung und Umfang der Implementierung ... 277
7.2 Erstellung von Komponenten für die Simulation von Halbleiterproduktionssystemen ... 279
7.2.1 Erstellung einer halbleiterspezifischen Plugin-Komponente ... 279
7.2.2 Erstellung von halbleiterspezifischen Simulationsbausteinkomponenten ... 282
7.2.3 Erstellung von Kommandos ... 286
7.2.4 Erstellung einer halbleiterspezifischen Auswertungskomponente ... 289
7.3 Benutzung der erstellten Komponenten ... 290
7.3.1 Verwendung innerhalb des BUIS Umberto ... 290
7.3.2 Verwendung innerhalb des Stoffstromsimulators ... 297
7.4 Simulationsstudie ... 309
7.4.1 Erkenntnisobjekt und Zielsetzung ... 309
7.4.2 Modellentwicklung, -implementierung und Datenerhebung ... 310
7.4.3 Modellvalidierung und Durchführung von Simulationsexperimenten ... 313
7.4.4 Ergebnisse ... 314

8 Zusammenfassung und Ausblick ... 317
8.1 Innovationsbeiträge der Arbeit ... 317
8.2 Offene Punkte und Ausblick ... 319

Anhang A: Typbibliotheken ... 323

Anhang B: Notation der verwendeten Klassendiagramme ... 351

Anhang C: Beispiel einer XML-Datei zum Abspeichern eines Modells 353

Literaturverzeichnis 357

Glossar 365

Stichwortverzeichnis 373