

Jörg Bergbauer

**Entwicklung eines Systems zur
interaktiven Simulation von Produktionssystemen
in einer Virtuellen Umgebung**

Vorsitzender der Promotionskommission

Herr Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter

Hauptberichterstatter

Herr Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Berichterstatter

Herr Prof. Dr.-Ing. Dietrich Ziems

Tag der mündlichen Prüfung

7. Juni 2002

Das vorliegende Buch ist die inhaltlich unveränderte Wiedergabe der Dissertation, die der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal in der Sitzung vom 16. April 2002 zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs von Dipl.-Wirt.-Ing. Jörg Bergbauer vorgelegt wurde.

D104

Dissertation TU Clausthal 2002

Innovationen der Fabrikplanung und -organisation

Band 8

Jörg Bergbauer

**Entwicklung eines Systems zur interaktiven
Simulation von Produktionssystemen in einer
Virtuellen Umgebung**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Bergbauer, Jörg:

Entwicklung eines Systems zur interaktiven Simulation von
Produktionssystemen in einer Virtuellen Umgebung/ Jörg Bergbauer.

Aachen : Shaker, 2002

(Innovationen der Fabrikplanung und -organisation; Bd. 8; Hrsg. Univ.-Prof.
Dr.-Ing. Uwe Bracht)

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-0553-5

Copyright Shaker Verlag 2002

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0553-5

ISSN 1615-5211

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

Vorwort des Herausgebers

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Fabrikplanung und -organisation ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muß jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflußlogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die Lösungsstrategien beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozeßketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teilebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muß bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Hierfür bietet sich die inzwischen bis zur Virtuellen Realität entwickelte Simulationstechnik an. Mit ihr kann der Planungsprozeß entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.

Clausthal, im Juni 2002

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Leiter des Kompetenzzentrums Virtual Reality und Visual Simulation am Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg sowie bei der DSEngineering GmbH als Leiter des Bereiches Digital Manufacturing in Darmstadt. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch Herrn Professor Dr.-Ing. Uwe Bracht, dem Leiter des Instituts für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) an der Technischen Universität Clausthal. Ihm gilt mein besonderer Dank für die Betreuung und wohlwollende Unterstützung der Dissertation sowie der Möglichkeit zur Promotion. Herrn Professor Dr.-Ing. Dietrich Ziems von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg danke ich für die intensive Gesprächsbereitschaft und die Übernahme der Zweitberichterstattung.

Für die freundschaftliche und konstruktive Zusammenarbeit danke ich meinen Mitarbeitern und Kollegen vom Fraunhofer IFF. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dirk Scheffter, der mir häufig als kompetenter Diskussionspartner zu Fragestellungen der Softwareentwicklung im Bereich Virtual Reality zur Verfügung stand. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Gebhardt und Herrn Dr. de Molière der DSEngineering GmbH, die mir den erforderlichen Freiraum bei der Anfertigung der wissenschaftlichen Arbeit in der Praxis gegeben haben.

Danken möchte ich all den Menschen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit motiviert und in verschiedenster Weise hervorragend unterstützt haben. Meine ganz besondere Verbundenheit gilt dabei meinen langjährigen Freunden Eva und Till Hofmann, die mir mit viel Geduld sowie Rat und Tat zur Seite standen. Ferner gilt mein Dank Frau Christine Bitter, die stets ein offenes Ohr für meine Gedanken und Probleme hatte. Weiterhin danke ich Herrn Ulrich Lappe, Frau Christiane Kienle, Herrn Mario Spiewack, Frau Ursula Wiegand, Herrn Ingo Wend, Frau Regina Thomschke, Herrn Thomas Beuschlein, Herrn Frank Strasmann, Frau Karla Zorn sowie Herrn Steffen Gröpke. Jeder von ihnen hat auf seine Art und Weise einen Teil zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Und nicht zuletzt danke ich den vielzähligen Ungenannten, die mich durch die Höhen und Tiefe dieser Arbeit begleitet haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich auf dem langen Weg bis zur Dissertation begleitet haben. Sie haben die Voraussetzungen für meinen bisherigen Lebensweg geschaffen und mir immer Rückhalt gegeben.

Magdeburg, im Juni 2002

Jörg Bergbauer

Zusammenfassung

Funktionalitätsuntersuchungen sowie Analysen des Störungsverhaltens stellen einen wesentlichen Bestandteil bei der Planung von Produktionssystemen dar. Eine ausschließliche Fokussierung der Betrachtung hinsichtlich der Veränderung systemeigener Größen sowie den Wirkverknüpfungen zwischen den einzelnen Elementen ist jedoch bei den heutigen, mehrdimensionalen, flexibel agierenden Systemen nicht mehr ausreichend. Daher gewinnen eine räumliche und realitätsnahe Visualisierung von Produktionssystemen in einer Virtuellen Umgebung, die Möglichkeit zur Abbildung des funktionalen bzw. kinematischen Verhaltens der einzelnen Objekte sowie die Integration des Benutzers in die künstliche Welt immer mehr an Bedeutung. Sie erlauben die Erschließung neuer Potentiale und damit andersgelagerter Untersuchungsschwerpunkte.

In der vorliegenden Arbeit wird ein System entwickelt, welches die echtzeitorientierte Visualisierung und Simulation komplexer Produktionssysteme mit ihren Abläufen und deren interaktive Manipulation in einer Virtuellen Umgebung ermöglicht. Grundlage hierfür ist ein Konzept, welches auf der Verknüpfung eines VR-Systems mit einem Simulationssystem über eine Kommunikationsschnittstelle basiert.

Die Repräsentation der Materialflussbausteine des Simulationsmodells geschieht mittels sogenannten Animationsobjekten. Dabei handelt es sich um modular aufgebaute Objekte mit entsprechender Steuerungsfunktionalität, mit deren Hilfe graphisch-interaktiv ein Produktionssystem in einer Virtuellen Umgebung gestaltet, animiert und untersucht werden kann. Der Zugriff auf die Simulation erfolgt durch direkte Interaktion des Benutzers an bzw. mit den visualisierten Objekten.

Die hard- und softwaretechnische Umsetzung dieses Konzeptes in ein einsatzfähiges System umfasst sowohl die Integration bestehender Applikationen und kommerzieller Programmierwerkzeuge als auch die Erstellung neuer Bausteine und Softwarekomponenten. Hierfür werden Methoden und Verfahren entwickelt, die den Bereichen Visualisierung, Interaktion, Simulation und Datenanbindung zuzuordnen sind. Wesentlicher Kernpunkt ist dabei die Gestaltung und der Aufbau einer aufgaben- und benutzerorientierten Systemarchitektur. Dies schlägt sich in der Differenzierung zwischen einer Umgebung zum Aufbau und Konfigurieren des Produktionssystems sowie zur Ausführung der interaktiven Simulation in einer Virtuellen Umgebung nieder.

Durch den Einsatz des Systems im Rahmen unterschiedlicher Projekte konnte belegt werden, dass sich durch die interaktive Simulation von Produktionssystemen in einer Virtuellen Umgebung eine Vielzahl von Nutzenpotentialen erschließen lassen. Insbesondere durch die Möglichkeit zur umfassenden Partizipation der Mitarbeiter sowie zur Untersuchung des Zusammenspiels von Mensch und Maschine im Produktionssystem konnten eine Vielzahl an Fehlerquellen ausgeschlossen und damit letztendlich eine Verbesserung und Beschleunigung der Planungs- und Gestaltungsprozesse erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problematik	2
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Vorgehensweise.....	3
2	Planung und Gestaltung von Produktionssystemen	6
2.1	Systemtheoretische Betrachtung komplexer Produktionssysteme.....	6
2.1.1	Die Produktion als System.....	7
2.1.2	Umgang mit komplexen Systemen	10
2.2	Systematik zur Entwicklung von Produktionssystemen.....	12
2.2.1	Die Serienfertigung als komplexes Produktionssystem	12
2.2.2	Gestaltung komplexer Produktionssysteme zur Serienfertigung	14
2.2.3	Partizipation am Planungs- und Gestaltungsprozess	18
2.2.3.1	Interne Partizipation	19
2.2.3.2	Externe Partizipation.....	20
2.3	Ansatz und Ziel neuer Methoden	21
2.3.1	Modellbasierter Erkenntnisprozess.....	21
2.3.2	Hilfsmittel zur modellbasierten Planung.....	22
3	Simulation von Produktionssystemen	26
3.1	Modellbildung und Simulation	27
3.1.1	Modelle dynamischer Systeme.....	27
3.1.2	Simulation dynamischer Systeme.....	30
3.2	Einsatz der Simulationstechnik	32
3.2.1	Anwendungsgebiete der Simulationstechnik	32
3.2.2	Vorgehensweise bei Simulationsstudien	35
3.2.3	Das Produktionssystem als Objekt der Modellierung	37
3.3	Werkzeuge zur Simulation	39
3.3.1	Aufbau von Simulationssystemen.....	39
3.3.2	Arten von Simulationssystemen	41
3.3.2.1	Simulationssprachen.....	41
3.3.2.2	Graphische Simulationswerkzeuge.....	42
3.3.3	Defizite klassischer Simulationssysteme	43
4	Virtual Reality als User-Interface	45
4.1	Begriffe, Abgrenzung und Entwicklungsgeschichte.....	45
4.1.1	Definition und Abgrenzung des Begriffs Virtual Reality	46
4.1.2	Entwicklungsgeschichte	48

4.2	Aufbau eines Virtual Reality-Systems	50
4.2.1	Modellierung	50
4.2.2	Präsentation	51
4.2.2.1	Software	52
4.2.2.2	Rechnersysteme	54
4.2.2.3	Visualisierungssysteme	55
4.2.3	Interaktion	58
4.2.3.1	Trackingsysteme	58
4.2.3.2	3D-Eingabegeräte	59
4.2.4	Kategorien der Virtuellen Realität	59
4.3	Virtuelle Umgebung komplexer Produktionssysteme	61
4.3.1	Modelle technischer Objekte	61
4.3.1.1	Gestaltmodell	61
4.3.1.2	Funktionsmodell	62
4.3.2	Das Produktionssystem als Szene	63
4.3.2.1	Aufbau einer Szene	64
4.3.2.2	Szenendarstellung	65
4.4	Produktionssysteme verstehen mittels Virtual Reality	66
5	Handlungsbedarf und Anforderungen	69
5.1	Ableitung des Handlungsbedarfs	69
5.2	Definition der Anforderungen	70
5.2.1	Anforderungen aus Anwendungssicht	71
5.2.2	Systemtechnische Anforderungen	72
6	Interaktive Simulation in einer Virtuellen Umgebung	75
6.1	Grundprinzip des Systems	75
6.2	Verfahren zur interaktiven Simulation	78
6.3	Untersuchungsgegenstand und Erkenntnisziele	84
6.4	Aufbau des graphischen Repräsentanten	87
6.4.1	Bausteine eines Simulationsmodells mit eM-Plant	87
6.4.2	Ableitung des VR-Modells	89
6.4.2.1	Differenzen in der Objektspezifikation	89
6.4.2.2	Ganzheitliche Abbildung eines Produktionssystems	91
6.4.3	Modellbildung und Funktionskonfiguration	93
6.4.3.1	Einsatz von Animationsobjekte	94
6.4.3.2	Ansatz zur Modellbildung für Animationsobjekte	95
6.4.3.3	Geometrische Aggregation eines Produktionssystems	97
6.4.3.4	Definition der Funktion von Animationsobjekten	99
6.4.4	Programmierung von Animationsobjekten	101

6.5	Interaktion mit dem virtuellen Produktionssystem	103
6.5.1	Formen der Interaktion	103
6.5.2	Auswirkungen von Interaktionen auf die Simulation	105
6.5.3	Interaktionsverarbeitung	109
6.5.3.1	Veränderung des Simulationsablaufes durch Interaktion am Objekt	109
6.5.3.2	Veränderung des Simulationsmodells durch Interaktion am Objekt	111
6.5.3.3	Veränderung des Simulationsmodells durch Interaktion mit dem Objekt	113
6.5.4	Erkennung von Kollisionen	116
7	Realisierung des Systems	119
7.1	Entwurf des Systemkonzeptes	119
7.2	Gestaltung und Aufbau der Systemarchitektur	122
7.2.1	Gesamtkonzept des Systems	122
7.2.2	Systemarchitektur im Autoren-Modus	125
7.2.2.1	Eingabe-Ebene	125
7.2.2.2	Ausgabe-Ebene	125
7.2.2.3	Systemkern	126
7.2.3	Systemarchitektur im Anwender-Modus	128
7.2.3.1	Eingabe-Ebene	128
7.2.3.2	Ausgabe-Ebene	129
7.2.3.3	Systemkern	129
7.2.4	Hard- und softwaretechnische Realisierung	132
7.2.4.1	Hardware	132
7.2.4.2	Software	132
7.3	Datenanbindung	134
7.3.1	Modelldatenanbindung	134
7.3.1.1	Datenkonvertierung	135
7.3.1.2	Datenaufbereitung	136
7.3.1.3	Datenbereitstellung	140
7.3.2	Anbindung des Simulationssystems	143
7.3.2.1	Kommunikationsstruktur	143
7.3.2.2	Steuerung der Systeme	146
8	Einsatz des Systems	148
8.1	Vorgehensweise	148
8.1.1	Vorbereitungsphase	148
8.1.2	Durchführung und Auswertung	153

8.2 Einsatzfelder des Systems	155
8.2.1 Anlagenprojektierung.....	155
8.2.2 Funktionsprüfung.....	156
8.2.3 Arbeitsplatzgestaltung	157
8.2.4 Gebäudeplanung	158
8.2.5 Mitarbeiterqualifikation.....	159
8.3 Nutzenpotentiale	160
9 Zusammenfassung und Ausblick	162
Abbildungsverzeichnis.....	164
Abkürzungen und Formelzeichen	167
Literaturverzeichnis.....	169