





Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
der Technischen Universität München

**Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen  
Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen**

**Michael Spitzweg**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ. Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner

Die Dissertation wurde am 04.03.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.07.2009 angenommen.



Michael Spitzweg

**Methode und Konzept für den Einsatz eines  
physikalischen Modells in der Entwicklung  
von Produktionsanlagen**



Herbert Utz Verlag · München

**Forschungsberichte IWB**

Band 233

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2009

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks,  
der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem  
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur  
auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2009

ISBN 978-3-8316-0931-4

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# **Geleitwort der Herausgeber**

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner, dem Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Ein besonderer Dank gilt hierbei Frédéric-Felix Lacour, der die Arbeiten im Bereich der Physiksimulation für Produktionsanlagen mit Sicherheit erfolgreich weiterführen wird.

Ebenso danke ich meinen Eltern und meiner Schwester, die mich vorbildlich unterstützt und stets zum Anfertigen dieser Arbeit motiviert haben. Einen ganz besonderen Platz in meinem Herzen nimmt meine Frau Theresa ein, die mir durch ihr großes Verständnis für meine Arbeit in jeder Situation zur Seite steht.

München, im August 2009

*Michael Spitzweg*



# Verzeichnisse

## Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>I</b>
Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Abkürzungsverzeichnis .....	XI
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit .....	4
1.3 Vorgehensweise.....	5
<b>2 Situationsanalyse .....</b>	<b>7</b>
2.1 Begriffsbestimmung .....	7
2.1.1 Vorbemerkung.....	7
2.1.2 Echtzeit.....	7
2.1.3 Simulationsmodell.....	7
2.1.4 Verhaltensmodell .....	8
2.1.5 Verhaltenssimulation.....	9
2.1.6 Kinematikmodell.....	9
2.1.7 Kinematiksimulation .....	9
2.1.8 Materialflussmodell.....	9
2.1.9 Visualisierungsmodell.....	10
2.1.10 Physikmodell.....	10

## **Verzeichnisse**

---

2.1.11 Physics Engine .....	10
2.1.12 Physiksimulation .....	10
2.1.13 Starrkörpersimulation.....	11
2.2 Aufgaben und Ablauf der virtuellen Inbetriebnahme .....	11
2.3 Defizite und Handlungsfelder .....	13
<b>3 Grundlagen und Stand der Technik.....</b>	<b>17</b>
3.1 Allgemeines.....	17
3.2 Virtuelle Inbetriebnahme.....	17
3.2.1 Grundlagen.....	17
3.2.2 Software-in-the-Loop.....	19
3.2.3 Hardware-in-the-Loop.....	19
3.2.4 Modellbildung für eine virtuelle Inbetriebnahme .....	20
3.2.5 Zusammenfassung.....	22
3.3 Physiksimulation .....	23
3.3.1 Allgemeines.....	23
3.3.2 Kollisionserkennung .....	25
3.3.3 Strategien zur Komplexitätsreduzierung.....	26
3.3.4 Berechnung der Kollisionsinformation.....	34
Kollisionsbehandlung mithilfe der Starrkörpersimulation .....	37
3.3.5 Bibliotheken für die Starrkörpersimulation .....	44
3.3.6 Simulationsumgebungen mit Starrkörpersimulation .....	47
3.3.7 Zusammenfassung.....	49
3.4 Virtual-Reality-Technologie .....	50

3.4.1	Allgemeines.....	50
3.4.2	Eingabe.....	52
3.4.3	Ausgabe.....	58
3.4.4	Zusammenfassung.....	61
3.5	Zusammenfassung der Grundlagen und des Stands der Technik.....	62
<b>4</b>	<b>Anforderungsanalyse .....</b>	<b>63</b>
4.1	Allgemeines.....	63
4.2	Methodische Anforderungen.....	63
4.3	Technische Anforderungen .....	65
4.3.1	Physiksimulation .....	65
4.3.2	Integration der Sensoren .....	65
4.3.3	Integration von Gelenken.....	66
4.3.4	Simulationszyklus .....	66
4.3.5	Schnittstellen .....	67
4.3.6	Skalierbare Lösung.....	67
4.3.7	Konfigurierbarkeit der Simulationsszene.....	67
4.3.8	Interaktion .....	68
4.4	Bewertung der Anforderungen.....	68
<b>5</b>	<b>Konzept und Systementwurf .....</b>	<b>71</b>
5.1	Allgemeines.....	71
5.2	Modellerstellung.....	71
5.2.1	Erstellung des VisualisierungsmodeLLs .....	71
5.2.2	Erstellung des Physik- und Kinematikmodells .....	73

## **Verzeichnisse**

---

5.2.3	Integration von Sensoren.....	75
5.3	Simulationsumgebung mit Physikmodellen.....	76
5.3.1	Konfiguration .....	76
5.3.2	Parallelisierung.....	77
5.3.3	Auswahl von Kollisionserkennung und -behandlung .....	79
5.4	Eingabe .....	80
5.5	Ausgabe .....	82
5.6	Zusammenfassung.....	83
<b>6</b>	<b>Umsetzung und beispielhafte Anwendung.....</b>	<b>85</b>
6.1	Allgemeines.....	85
6.2	Gestaltung und Aufbau der Systemarchitektur .....	85
6.2.1	Allgemeines.....	85
6.2.2	Modulare Struktur .....	86
6.2.3	Klassendiagramm .....	88
6.2.4	Konfiguration .....	90
6.2.5	Physiksimulation in Ve <sup>3</sup> .....	95
6.2.6	Externe Kommunikation .....	97
6.3	Eingabe .....	98
6.3.1	Navigation.....	99
6.3.2	Selektion.....	100
6.3.3	Manipulation .....	100
6.3.4	Applikationssteuerung.....	101
6.4	Ausgabe .....	101

6.5	Realisierung des Hardwareaufbaus .....	101
6.6	Exemplarische Anwendung.....	104
6.6.1	Allgemeines.....	104
6.6.2	Erstellung des Visualisierungsmodells .....	106
6.6.3	Erstellung des Physik- und Kinematikmodells.....	108
6.6.4	Integration der Sensoren .....	109
6.6.5	Beschreibung des Verhaltensmodells und der Kommunikation mit dem Simulationsrechner Ve <sup>3</sup> .....	110
6.6.6	Simulation .....	112
6.6.7	Ergebnisse .....	117
<b>7</b>	<b>Nutzenpotenziale und Bewertung .....</b>	<b>119</b>
7.1	Allgemeines.....	119
7.2	Nutzenpotenziale .....	119
7.2.1	Vertrieb und Projektierung.....	119
7.2.2	Entwicklung und Inbetriebnahme .....	119
7.2.3	Produktion .....	120
7.2.4	Schulung.....	120
7.3	Technologische Bewertung .....	121
7.4	Wirtschaftliche Bewertung.....	123
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>127</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>129</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>139</b>
10.1	Formelverzeichnis .....	139

## **Verzeichnisse**

---

10.2 Herstellerverzeichnis .....	140
----------------------------------	-----

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1-1:</i> Gliederung und Aufbau der Arbeit.....	5
<i>Abbildung 2-1:</i> Aufbau eines Simulationsmodells für die virtuelle Inbetriebnahme ....	8
<i>Abbildung 2-2:</i> Skizzierung der einzelnen Phasen der virtuellen Inbetriebnahme .....	13
<i>Abbildung 3-1:</i> Systemaufbau für den SIL- und HIL-Ansatz der virtuellen Inbetriebnahme .....	18
<i>Abbildung 3-2:</i> Beschreibung des dynamischen Verhaltens nach LENNERZ 2002 .....	24
<i>Abbildung 3-3:</i> Zeitlicher Ablauf der Physiksimulation mit den beiden Phasen Kollisionserkennung und Kollisionsbehandlung .....	25
<i>Abbildung 3-4:</i> Einteilung von 3-D-Modellen nach Lin & Gottschalk 1998.....	26
<i>Abbildung 3-5:</i> Gleichmäßige Raumaufteilung.....	27
<i>Abbildung 3-6:</i> Schematische Darstellung der Raumaufteilung mithilfe eines Oktonärbaumes .....	28
<i>Abbildung 3-7:</i> Schrittweiser Aufbau eines BSP-Baumes durch Binary-Space-Partition .....	29
<i>Abbildung 3-8:</i> Verschiedene Hüllkörper zur schnelleren Kollisionserkennung .....	30
<i>Abbildung 3-9:</i> Kollisionsüberprüfung bei AABBs durch Projektion auf die Koordinatenachsen (Vereinfachte 2-D-Darstellung).....	31
<i>Abbildung 3-10:</i> Beispiel einer unmöglichen Kollisionsüberprüfung bei OBBs durch Projektion auf die Koordinatenachsen (Vereinfachte 2-D-Darstellung) .....	32
<i>Abbildung 3-11:</i> Verwendung des Separating-Axis-Theorems für die Kollisionsüberprüfung bei OBBs .....	33
<i>Abbildung 3-12:</i> 2-D-Beispiel für Closest-feature-Algorithmus unter Verwendung der Voronoi-Region.....	35
<i>Abbildung 3-13:</i> Voronoi-Regionen von Polyedern für die Features Punkt, Kante und Seitenfläche nach Miritch 1998a am Beispiel eines Würfels.....	36
<i>Abbildung 3-14:</i> Definition eines Starrkörpers als System von Massepunkten mit konstantem Abstand $r_{ij}$ aller Punktpaare nach Goldstein et al. 2002.....	39

## **Verzeichnisse**

---

<i>Abbildung 3-15: Wichtige Gelenkkarten für die Simulation von Starrkörpern; ein Scharniergelenk mit einem Freiheitsgrad, ein Kugelgelenk mit drei Freiheitsgraden und ein Schiebegelenk mit einem Freiheitsgrad .....</i>	40
<i>Abbildung 3-16: Beschreibung eines Simulationszyklus bei der Starrkörper-simulation nach Parent 2002 .....</i>	41
<i>Abbildung 3-17: 2-D-Ansicht einer Kontakt situation bei der Kollisionsauflösung durch analytische Verfahren; links eine Kollision und rechts ein anhaltender Kontakt zwischen den Objekten A und B (vgl. Eberly 2004, S. 241) .....</i>	43
<i>Abbildung 3-18: Skalierbares Engineering – Kombination von VR-Technologien durch die Anreicherung mit Ergebnissen aus anderen Simulationswerkzeugen (vgl. Aurich et al. 2007) .....</i>	51
<i>Abbildung 3-19: Translatorische und rotatorische Freiheitsgrade eines Objektes im virtuellen Raum (vgl. Burdea &amp; Coiffet 2003 S. 17).....</i>	52
<i>Abbildung 3-20: Datenhandschuh CyberGlove® mit Exoskelett CyberGrasp™ für die Erfassung von 22 Freiheitsgraden der Hand mit Kraftrückgabe auf die Finger des Benutzers (Quelle: Immersion Corporation).....</i>	56
<i>Abbildung 4-1: Zusammensetzung der für ein Physikmodell benötigten Daten und die Möglichkeiten der Automatisierung der Modellerstellung .....</i>	64
<i>Abbildung 5-1: Vierstufiges Verfahren zur Erstellung eines Visualisierungsmodells für den Einsatz in einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen .</i>	72
<i>Abbildung 5-2: Erstellung des Physik- und Kinematikmodells, aufbauend auf dem simplifizierten Geometriemodell des vorhergehenden Abschnitts .....</i>	74
<i>Abbildung 5-3: Reflexionslichtschranke – Sender und Empfänger (1) sind in einem Gehäuse verbaut, der Lichtstrahl wird durch einen Reflektor (2) zurückgelenkt. ....</i>	75
<i>Abbildung 5-4: Beispielhafte Integration einer doppelten Reflexions-lichtschranke als Kollisionsobjekt in der Simulation .....</i>	76
<i>Abbildung 5-5: Beschreibung eines Objektes – Definition der Objekteigenschaften .</i>	77
<i>Abbildung 5-6: Parallelisierung der Systemprozesse .....</i>	78
<i>Abbildung 5-7: 3-D-Navigation in der Simulationsumgebung zur Analyse der Produktionsanlage .....</i>	81
<i>Abbildung 6-1: Systemarchitektur der Simulationsplattform Virtual Engineering Environment Extended (Ve<sup>3</sup>) .....</i>	86
<i>Abbildung 6-2: UML-Klassendiagramm der wichtigsten Klassen der einzelnen Module von Ve<sup>3</sup> .....</i>	89

<i>Abbildung 6-3: Konfiguration der Simulationsumgebung mit XML-Struktur (Auszug des XML-Schemas).....</i>	<i>91</i>
<i>Abbildung 6-4: Komponenten der Konfiguration einer Simulationsszene.....</i>	<i>92</i>
<i>Abbildung 6-5: XML-Struktur der Konfigurationsdatei physics.xsd für die physikalischen Eigenschaften, Gliederung in bodies und joints.....</i>	<i>93</i>
<i>Abbildung 6-6: XML-Struktur der Konfigurationsdatei physics.xsd für die physikalischen Eigenschaften, Beschreibung body.....</i>	<i>94</i>
<i>Abbildung 6-7: XML-Struktur der Konfigurationsdatei physics.xsd für die physikalischen Eigenschaften, Beschreibung joint .....</i>	<i>95</i>
<i>Abbildung 6-8: UML-Klassendiagramm für die Abbildung der Simulationsobjekte (vgl. EGERMEIER 2008) .....</i>	<i>97</i>
<i>Abbildung 6-9: Trackbares Gamepad zur Interaktion .....</i>	<i>98</i>
<i>Abbildung 6-10: Belegung der analogen Joysticks für die Navigation durch die Simulationsszene .....</i>	<i>99</i>
<i>Abbildung 6-11: Struktur des Teststandes.....</i>	<i>102</i>
<i>Abbildung 6-12: Beispielhafte Sortierstation mit vier Transportbändern, zwei Lichtschranken, einem Ausschieber und einem Auffangbehälter ....</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 6-13: Simplifizierung des triangulierten Modells der Produktionsanlage</i>	<i>107</i>
<i>Abbildung 6-14: XML-Beschreibung der für die Physiksimulation notwendigen Parameter des Ausschiebers .....</i>	<i>108</i>
<i>Abbildung 6-15: XML-Beschreibung der Kinematik des Ausschiebers für die Physiksimulation .....</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung 6-16: Physikalische XML-Beschreibung eines Sensors .....</i>	<i>110</i>
<i>Abbildung 6-17: XML-Beschreibung des Remote-Objektes eines Sensors .....</i>	<i>110</i>
<i>Abbildung 6-18: Bedienoberfläche des Verhaltensmodells in der Simulations- software WinMOD® .....</i>	<i>111</i>
<i>Abbildung 6-19: Bilderserie eines Teilausschnitts der Simulation – Materialfluss- stau und Umschichten zwischen zwei Förderbändern durch Leitbleche .....</i>	<i>114</i>
<i>Abbildung 6-20: Bilderserie eines Teilausschnitts der Simulation – Abschieben eines Teils.....</i>	<i>115</i>
<i>Abbildung 6-21: Bilderserie eines Teilausschnitts der Simulation – Transport von Teilen über eine schräge Rutsche .....</i>	<i>116</i>

## **Verzeichnisse**

---

## Abkürzungsverzeichnis

2-D	zweidimensional
3-D	dreidimensional
AABB	Axis Aligned Bounding Box (Hüllquader mit zu den Koordinatensystemachsen übereinstimmenden Oberflächennormalen)
BKM	Bayerisches Kompetenznetzwerk für Mechatronik
BSP	Binary Space Partition (binäre Raumaufteilung)
CAD	Computer Aided Design (computergestütztes Konstruieren)
CAE	Computer Aided Engineering (computergestütztes Entwickeln)
CAx	Computer Aided x (x steht als Platzhalter, siehe auch CAD und CAE)
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
CPU	Central Processing Unit (Hauptprozessor)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoF	Degree of Freedom (Freiheitsgrad)
FEM	Finite-Elemente-Methode
GB	Gigabyte (Einheit für Speichergröße)
GJK	Gilbert-Johnson-Keerthi
HIL	Hardware-in-the-Loop (Der Regelkreis wird mittels Hardware für die Simulation geschlossen.)
HMD	Head-Mounted-Display
IBDS	Impulse-Based Dynamic Simulation
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IP	Internet Protocol (Netzwerkprotokoll zum Austausch von Daten zwischen zwei Rechnern, angeordnet in der Vermittlungsschicht des ISO/OSI-Schichtenmodells)
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

## **Verzeichnisse**

---

<b>k-DOP</b>	k-discrete Oriented Polytop (Verallgemeinerung einer AABB)
<b>LCP</b>	Linear Complementarity Problem (lineares Komplementaritätsproblem)
<b>OBB</b>	Oriented Bounding Box (gerichteter Hüllquader)
<b>ODE</b>	Open Dynamics Engine™
<b>OSG</b>	OpenSceneGraph
<b>PAL</b>	Physical Abstraction Layer (Abstraktionsschicht für die Bibliothek zur Physiksimulation)
<b>PC</b>	Personal Computer (Einzelplatzrechner)
<b>PCI</b>	Peripheral Component Interconnect (Bus-Standard zur Verbindung von Peripheriegeräten mit dem Chipsatz eines Prozessors)
<b>PDM</b>	Produktdatenmanagement
<b>PHANTOM®</b>	Personal Haptic Interface Mechanism
<b>SDL</b>	Simple Direct Media Layer
<b>SIL</b>	Software-in-the-Loop (Der Reglerkreis wird mittels Software für die Simulation geschlossen.)
<b>SiLVIA</b>	Simulation Library for Virtual-Reality and Interactive Applications
<b>SOLID</b>	Software Library for Interference Detection
<b>SPE</b>	Simple Physics Engine
<b>SPS</b>	Speicherprogrammierbare Steuerung
<b>STEP</b>	Standard for the Exchange of Product Model Data
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol (Protokoll für den Austausch von Daten zwischen zwei Rechnern, angeordnet in der Transportschicht des ISO/OSI-Schichtenmodells)
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol (verbindungsloses Netzprotokoll)
<b>USB</b>	Universal Serial Bus (serielles Bussystem)
<b>USIS</b>	Universal Simulation System
<b>Ve²</b>	Virtual Engineering Environment
<b>Ve³</b>	Virtual Engineering Environment Extended

VR	Virtual-Reality (Virtuelle Realität)
VRCA	Virtual-Reality Center Aachen
VRML	Virtual-Reality Modeling Language (Beschreibungssprache für Modelle der Virtuellen Realität)
XML	Extended Markup Language



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

„Die sicherste Grundlage einer Produktion ist die Qualität. Danach und eine große Strecke weiter kommen die Produktionskosten.“

Andrew Carnegie (1835-1919) erkannte schon vor langer Zeit, was auch heute noch gilt: Qualität ist ein wichtiger Faktor in der Produktion und in unserer Zeit auch häufig ein entscheidender Standortfaktor. Die Qualität des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus ist weit über die Grenzen der Bundesrepublik anerkannt und sichert wichtige Arbeitsplätze in Deutschland. Oftmals verhindert nur der über Jahrzehnte erlangte Ruf von Qualität und Zuverlässigkeit eine Verlagerung von Produktionsstätten in so genannte Niedriglohnländer.

Es gilt deshalb, diesem Qualitätsanspruch gerecht zu werden. Kurze Lieferzeiten, ausgereifte Produkte und termintreue Lieferung und Inbetriebnahme sind hierfür wichtige Faktoren. Vor allem durch eine schnelle Inbetriebnahme und einen planmäßigen Produktionsanlauf kann der Kunde von der Qualität der gekauften Produktionsanlage überzeugt werden. Darüber hinaus sind Verzögerungen bei der Inbetriebnahme auch für den Hersteller sehr kostenintensiv. Gerade in diesem Zeitraum muss in der Regel ein großer Teil der Herstellungskosten vorfinanziert und somit sehr viel Geld für Zinsen aufgewendet werden. Bei einer Verzögerung eines Projektes aufgrund von Fehlern, die erst bei der Inbetriebnahme gefunden werden, kann durch die Zinsaufwendungen der kalkulierte Gewinn deutlich gemindert bzw. sogar in einen Verlust gewandelt werden.

Aus diesen Gründen wird mittlerweile ein großer Aufwand betrieben, um das Risiko der Inbetriebnahme, von deren Tätigkeiten ca. 90 % auf die Elektrik und Steuerungstechnik entfallen (EVERSHEIM 1990), abzusichern. Dies wird vor allem durch Simulation erreicht, mit der möglichst viele Fehlerfälle nachgestellt werden, um so Ausfälle der Maschine oder Anlage ausschließen zu können. Im Mittelpunkt der Simulation steht meist die Steuerungssoftware. Studien haben gezeigt, dass 70 % der Inbetriebnahmemezeit für die Beseitigung von Softwarefehlern in der Steuerungstechnik aufgewendet werden müssen (VDW-BERICHT 1997, SPATH & LANDWEHR 2000). Um die Steuerungssoftware vor der eigentlichen Inbetriebnahme testen zu können, wird seit kurzer Zeit eine virtuelle Inbetriebnahme, bei der die Steuerungssoftware an einem Simulationsmodell getestet

wird, als Projektphase bei den Herstellern von Maschinen und Anlagen sehr erfolgreich eingeführt: Dieser Erfolg ist auf die „frühzeitige Fehlererkennung und Optimierung der einzelnen steuerungstechnischen Komponenten“ (PRITSCHOW 2002) zurückzuführen.

Mit der virtuellen Inbetriebnahme kann die Qualität der Software deutlich gesteigert und zugleich die Inbetriebnahmezeit verkürzt werden. Der Aufwand für eine virtuelle Inbetriebnahme ist jedoch nicht zu unterschätzen und stellt die Wirtschaftlichkeit meist in Frage. Besonders arbeitsaufwendig ist die Anfertigung des virtuellen Modells, mit dem die Steuerungssoftware getestet werden soll. Dies liegt daran, dass die Modelle in der Regel von Hand entwickelt werden müssen und nur selten Teile aus alten Inbetriebnahmeprojekten, und dann auch nur teilweise, kopiert werden können.

Die virtuelle Inbetriebnahme von Anlagen ist bislang nicht so verbreitet wie die virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen. Dies resultiert zum einen aus der Historie dieses Ansatzes, zum anderen liegt es an der Komplexität der Simulationsmodelle. Diese sind für Anlagen ungleich komplizierter, da für die Simulation des Materialflusses ein zusätzliches Simulationsmodell erstellt werden muss. Bislang werden hierzu Planungstools verwendet, die einen logischen Materialfluss abbilden können, der jedoch nicht auf den Geometrien der Anlage oder der Werkstücke beruht und somit die Aussagekraft der Simulation einschränkt. Fragen, wie z. B. ob bei einem Materialflusstau ein Verklemmungszustand auftritt, bleiben unbeantwortet.

Mit der virtuellen Inbetriebnahme können Fehler frühzeitig in der Steuerungssoftware gefunden werden, die ansonsten erst vor Ort beim Kunden nach Aufbau der Maschine oder Anlage entdeckt werden würden. Ferner lassen sich mit der virtuellen Inbetriebnahme auch Fehlerfälle nachstellen, die viel später, also erst im laufenden Betrieb der Maschine oder Anlage, zu Ausfällen oder sogar zu teuren Schäden an der Produktionsanlage führen können. Somit kann die Softwarequalität deutlich gesteigert werden (MEWES 2005, STETTER 2005, 2006a, 2006b). Es stellt sich jedoch die Frage, ob es nicht möglich ist, die Fehler bereits bei der Entwicklung finden zu können oder noch besser die Fehler von vorneherein zu verhindern, denn je später ein Fehler gefunden wird, desto teurer ist seine Beseitigung (ZÄH et al. 2004b). Daher gibt es die Bestrebung, eine so genannte *integrierte Entwicklung und Konstruktion* zu realisieren, bei der die Softwareentwicklung, die bisher erst nach Abschluss der mechanischen und elektrischen Konstruktion bzw. in manchen Unternehmen erst vor Ort auf der Baustelle ihre

Arbeit aufnahm, schon von Entwicklungsbeginn an eingebunden ist (BENDER et al. 2005b). Voraussetzung hierfür ist, dass zu jeder Zeit im Entwicklungsprozess ein Simulationsmodell zur Verfügung steht, mit dem die Entwickler Softwaretests durchführen können. Um die Integrität zwischen der zu testenden Software und der Simulationsmodelle zu gewährleisten, müssen im Laufe der Entwicklung mehrfach Simulationsmodelle erstellt werden. Der Aufwand für eine manuelle Anfertigung der Modelle ist sehr hoch und für eine *integrierte Entwicklung und Konstruktion* nicht wirtschaftlich. Die Automatisierung der Modellerstellung ist deshalb eine Grundvoraussetzung.

Die Entwicklung der Simulationsmodelle ist somit ein zentraler Punkt für den Erfolg eines integrierten Konstruktions- und Entwicklungsprozesses. Zum einen ist es aus wirtschaftlicher Sicht wichtig, den Aufwand für die Modellerstellung so gering wie möglich zu halten, zum anderen müssen für eine aussagekräftige Simulation die Modelle so detailgetreu wie möglich gestaltet werden. Bislang werden Simulationsmodelle von Hand erstellt, d. h. ein Experte entwickelt aus den Unterlagen der Maschine oder Anlage, in der Regel aus der Spezifikation, ein detailgetreues Simulationsmodell für die Maschine oder Anlage. Selbstverständlich kann bei ähnlichen Maschinen oder Anlagen auf bestehende Simulationsmodelle als Vorlage zurückgegriffen und es können Teile davon übernommen werden. Auf lange Sicht ist zu empfehlen, ein Baukastensystem von Simulationsmodellen anzulegen, um den Prozess der manuellen Modellbildung zu beschleunigen.

Für eine automatisierte Modellerstellung ist die Verwaltung der notwendigen Daten von entscheidender Bedeutung, denn es werden dazu sehr detaillierte Informationen über die Maschine oder Anlage bzw. über die verbauten Komponenten benötigt. In den Unternehmen wird für die Verwaltung der Daten in der Regel eine Software für das Produktdatenmanagement (PDM) eingesetzt, die sich aus Computer-Aided-Design-Systemen (CAD-Systemen) aufgrund der immer weiter steigenden Produktdatenmenge entwickelt hat. Für das PDM und das CAD finden sich sehr viele und sehr unterschiedliche Produkte, so dass von einer heterogenen Systemlandschaft gesprochen werden kann. Es gibt mittlerweile das Bestreben, Zulieferer von Komponenten zur Übergabe von Simulationsdaten oder sogar von speziellen Simulationsmodellen zu den gelieferten Komponenten zu verpflichten, um die Modellbildung für die Simulation möglichst einfach und aufwandsarm umsetzen zu können. Voraussetzung hierfür ist, die Austauschbarkeit der Daten und Modelle gewährleisten zu können. Aus diesem Grund wurden

in letzter Zeit Datenmanagement-Tools weiterentwickelt und diesen Anforderungen angepasst. Mithilfe dieser neuen Generation von Datenmanagementtools könnte schon bald eine automatisierte oder wenigstens teilautomatisierte Modellerstellung für Simulationen umgesetzt und somit ein wichtiger Schritt in Richtung eines integrierten Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses vollzogen werden.

### **1.2 Zielsetzung der Arbeit**

Einen integrierten Entwicklungs- und Konstruktionsprozess bei Maschinen- und Anlagenbauunternehmen erfolgreich umzusetzen, ist eine große Herausforderung, die jedoch sowohl den Anwendern als auch den Herstellern deutlich Zeit und somit Kosten sparen helfen kann. Voraussetzung für den Erfolg ist eine schnelle und aufwandsarme Erzeugung der Simulationsmodelle, um schon frühzeitig Softwaretests durchführen zu können.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode für die Erstellung von Physikmodellen zur Simulation von Maschinen und Anlagen im Rahmen eines integrierten Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses. Das vorzustellende Konzept wird anschließend an einem Anwendungsbeispiel prototypisch umgesetzt. Hierbei wird gezeigt, wie der Materialfluss einer Anlage mithilfe einer Physiksimulation realitätsnah abgebildet und somit die Aussagekraft der Simulation gesteigert werden kann. Außerdem wird erläutert, wie Physikmodelle aus Datenmanagementsystemen exportiert und aufbereitet werden können, womit die Modellerstellung für einen integrierten Entwicklungs- und Konstruktionsprozess vereinfacht werden kann.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Simulation von Maschinen und Anlagen, die mit Automatisierungslösungen unter Verwendung von so genannten Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) ausgestattet sind, die im Millisekundenbereich (z. B. 10 ms) getaktet sind. Auch die Simulation muss diesem Anspruch genügen, damit die Ergebnisse korrekt berechnet werden können. Daher wird in dieser Arbeit auf eine fotorealistische Darstellung der virtuellen Maschine oder Anlage verzichtet, da diese wertvolle Rechenkapazität beanspruchen und keinen Mehrwert für die Simulation bringen würde.

Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Simulationsmöglichkeiten für den Maschinen- und Anlagenbau zu erweitern, um so die Qualität der Steue-

rungsssoftware und der Produktionsanlage verbessern zu können. Anhand dieser Arbeit soll der technologische und wirtschaftliche Nutzen des Einsatzes von Physikmodellen für den integrierten Entwicklungs- und Konstruktionsprozess gegenüber dem herkömmlichen Vorgehen aufgezeigt werden.

### 1.3 Vorgehensweise

Für die Umsetzung der beschriebenen Ziele wird folgendermaßen vorgegangen (siehe Abbildung 1-1):

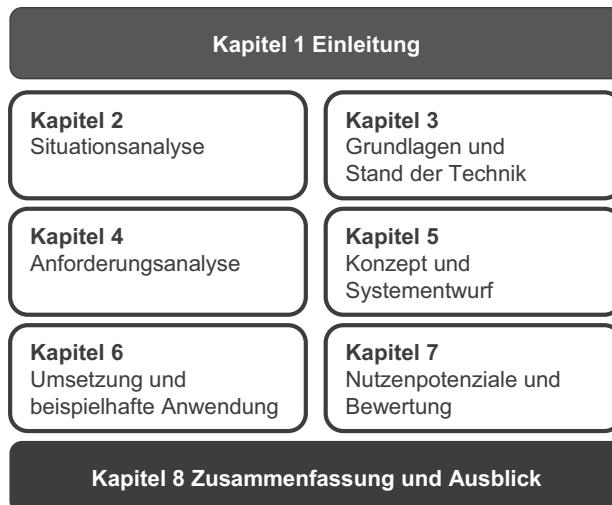


Abbildung 1-1: *Gliederung und Aufbau der Arbeit*

Nach der kurzen Einleitung erfolgt in **Kapitel 2** zunächst eine Begriffsbestimmung. Außerdem wird der Ablauf einer virtuellen Inbetriebnahme beschrieben. In diesem Abschnitt werden auch Defizite und Handlungsfelder dargestellt, die für einen erfolgreichen Einsatz von Physikmodellen in einem integrierten Entwicklungsprozess abgedeckt werden müssen. Das im Rahmen dieser Arbeit angefertigte Konzept basiert auf den Technologien der virtuellen Inbetriebnahme, der Physiksimulation und der Virtual-Reality (VR). Deshalb werden die Grundlagen und der Stand der Technik hierzu ausführlich in **Kapitel 3** vorgestellt. In **Kapitel 4** werden die Anforderungen an eine Simulationsumgebung, die mithilfe von Physikmodellen das Bewegungsverhalten und den Materialfluss der Maschi-

## 1 Einleitung

---

ne oder Anlage abbildet, konkretisiert. Dabei wird zwischen den methodischen und den technischen Anforderungen differenziert. **Kapitel 5** beschreibt das Konzept und den Systementwurf, um Physikmodelle generieren und in einer Simulationsumgebung nutzen zu können. Die Umsetzung der vorgestellten Methode wird in **Kapitel 6** detailliert erläutert. Darüber hinaus wird die Erprobung der Methode an einem Anwendungsbeispiel in diesem Kapitel gezeigt. Die Arbeit schließt mit einer technologischen und wirtschaftlichen Bewertung in **Kapitel 7** und einer Zusammenfassung und einem Ausblick in **Kapitel 8**.

## 2 Situationsanalyse

### 2.1 Begriffsbestimmung

#### 2.1.1 Vorbemerkung

Im Themenbereich der Simulation von Steuerungsprogrammen werden immer wieder viele Fachbegriffe verwendet, die an verschiedenen Stellen in der Literatur etwas unterschiedlich definiert sind. Um dem Leser das Verständnis der Arbeit zu erleichtern, wird im Folgenden eine Nomenklatur für die wichtigsten Grundbegriffe eingeführt.

#### 2.1.2 Echtzeit

*Echtzeit* bedeutet, dass das Ergebnis einer Berechnung innerhalb eines gewissen Zeitraumes garantiert vorliegt, d. h. bevor eine bestimmte Zeitschranke erreicht ist.

#### 2.1.3 Simulationsmodell

Unter dem *Simulationsmodell* einer Produktionsanlage ist ein spezielles Modell für die virtuelle Inbetriebnahme der Steuerungstechnik zu verstehen. Es besteht nach aktuellem Vorgehen bei der virtuellen Inbetriebnahme aus vier Teilmustern, und zwar dem Verhaltensmodell, dem Kinematikmodell, dem Materialflussmodell und dem Visualisierungsmodell (siehe Abbildung 2-1). Zukünftig könnte das Materialflussmodell durch ein Physikmodell ersetzt werden.

Das Simulationsmodell wird in der Literatur auch häufig als das virtuelle Modell einer Produktionsanlage bezeichnet.

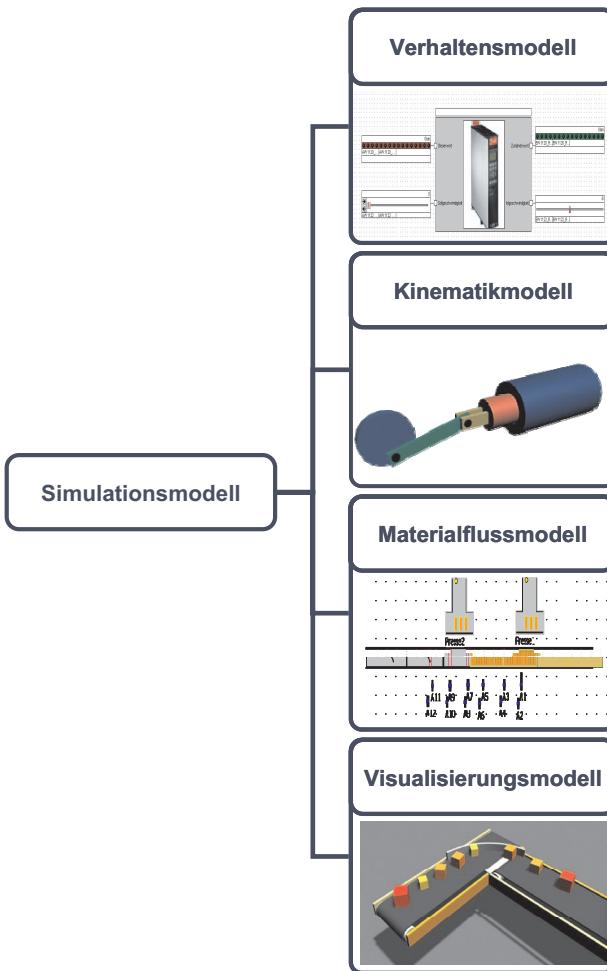


Abbildung 2-1: Aufbau eines Simulationsmodells für die virtuelle Inbetriebnahme

#### 2.1.4 Verhaltensmodell

Das *Verhaltensmodell* ist das Signalabbild des zu simulierenden Systems. Es beschreibt sowohl das Zeit- und Schaltverhalten als auch die Logik im System

bzw. der einzelnen Komponenten (z. B. Ventile, Pumpen, Zylinder). In der Literatur wird das Verhaltensmodell auch oft als Peripheriemodell bezeichnet.

### **2.1.5 Verhaltenssimulation**

Als *Verhaltenssimulation* wird die Softwareapplikation zur Simulation des Verhaltensmodells bezeichnet. In der Regel stehen Verhaltenssimulation und Verhaltensmodell in unmittelbarer Verbindung, weil die Verhaltenssimulation die Beschreibungssprache für das Verhaltensmodell vorgibt. Die Verhaltenssimulation wird in der Literatur auch oft als Peripheriesimulation bezeichnet (vgl. WÜNSCH 2008).

### **2.1.6 Kinematikmodell**

Das *Kinematikmodell* bildet die möglichen Verfahrbewegungen einer Produktionsanlage ab, d. h. alle Teile, die im Produktionsprozess bewegt werden können und sollen, werden speziell parametrisiert, so dass die Bewegungen im Modell hinterlegt sind. Das Kinematikmodell steht in engem Zusammenhang mit dem Visualisierungsmodell und häufig sind die Bewegungen in diesem mit gespeichert.

### **2.1.7 Kinematiks simulation**

Zur Veranschaulichung wird bei der virtuellen Inbetriebnahme eine *Kinematiksimulation* eingesetzt, mit der die Verfahrbewegungen der Maschine oder Anlage berechnet und visualisiert werden können. Dadurch können ohne Aufbau der realen Produktionsanlage Überprüfungen des Arbeitsraumes und der zeitlichen Abläufe durchgeführt werden.

### **2.1.8 Materialflussmodell**

Im *Materialflussmodell* ist der Transport der Werkstücke innerhalb der Produktionsanlage abgebildet. Ferner werden in diesem Modell die Sensoren der Produktionsanlage hinterlegt, die von den beförderten Werkstücken ausgelöst werden können (z. B. Lichtschranken oder Endlageschalter).

### **2.1.9 Visualisierungsmodell**

Zur Visualisierung wird für die virtuelle Inbetriebnahme ein *Visualisierungsmodell* der Produktionsanlage aufgebaut. Dieses kann von Hand aus Zeichnungen abgeleitet und nachgebildet oder aus dem CAD mithilfe entsprechender Schnittstellen (z. B. VRML) exportiert werden. Das Visualisierungsmodell wird oft auch als Geometriemodell der Produktionsanlage bezeichnet.

### **2.1.10 Physikalisches Modell**

Das *physikalische Modell* einer Produktionsanlage bildet die physikalischen Eigenschaften und Informationen ab. In dieser Arbeit wird zur Vereinfachung der Begriff *Physikmodell* (siehe 2.1.11) als Synonym für das *physikalische Modell* verwendet.

### **2.1.11 Physikmodell**

Das *Physikmodell* einer Produktionsanlage bildet neben der Geometrie auch bestimmte physikalische Eigenschaften und Informationen (z. B. Masse, Schwerpunkt, Reibungskoeffizienten zwischen den Oberflächen) ab. Zusätzlich werden in einem Physikmodell auch die Parameter der Umgebung (z. B. Gravitation) definiert.

### **2.1.12 Physics Engine**

Eine Softwarebibliothek, die eine Simulation von Objekten auf der Basis physikalischer Eigenschaften (z. B. Masse) ermöglicht, wird als Physics Engine bezeichnet. Die Berechnung erfolgt gemäß den physikalischen Grundlagen der Mechanik. Dabei werden mittels der Newton'schen Bewegungsgesetze die Kräfte ermittelt, die auf die einzelnen Körper wirken. Darüber hinaus werden auch die Gravitationskraft, die Federkräfte, Kollisionen zwischen Objekten und der Impuls miteinbezogen.

### **2.1.13 Physiksimulation**

Die *Physiksimulation* berechnet mithilfe einer Physics Engine das Bewegungserhalten der einzelnen Objekte und deren Zusammenwirken in einem Physikmodell.

### 2.1.14 Starrkörpersimulation

Bei der *Starrkörpersimulation* wird die Physiksimulation auf starre Körper (engl. Rigid Bodies) eingegrenzt, d. h. flexible oder sogar flüssige Körper werden von der Simulation ausgeschlossen.

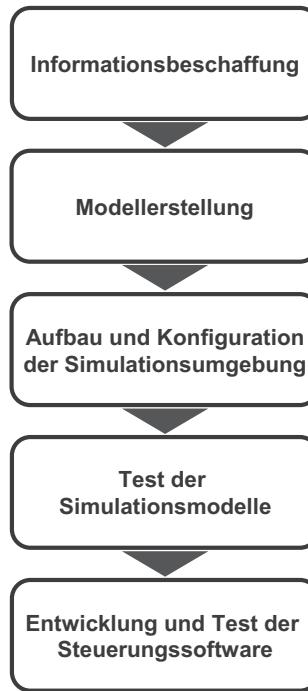
## 2.2 Aufgaben und Ablauf der virtuellen Inbetriebnahme

Die *virtuelle Inbetriebnahme*, auch als virtueller Funktionstest bezeichnet, wird von BENDER et al. 2005b definiert als „Methode zur Durchführung von Systemtests aus Sicht des Kunden bereits vor der Existenz des realen, vollständig integrierten Testobjekts, wobei fehlende Komponenten durch virtuelle Komponenten ersetzt werden“. Mithilfe der virtuellen Inbetriebnahme können somit Steuerungsprogramme schon vor dem physischen Aufbau einer Maschine oder einer Anlage am virtuellen Modell getestet werden. Dieses Verfahren soll dazu beitragen, die reale Inbetriebnahmzeit vor Ort deutlich zu verkürzen und einen schnelleren Start der Produktion herbeizuführen. Aktuelle Studien belegen, dass durch die virtuelle Inbetriebnahme und die damit verbundene Steigerung der Softwarequalität die reale Inbetriebnahmzeit um bis zu 80 % verkürzt werden kann (MEWES 2005, STETTER 2005).

Außerdem können mit der Testumgebung für die virtuelle Inbetriebnahme ohne Gefahr für den Bediener und für die Produktionsanlage Grenzsituationen simuliert werden. Dies ist bei einer realen Inbetriebnahme aufgrund des Risikos und der knappen Zeit meist nicht möglich. Zukünftig könnte die virtuelle Inbetriebnahme auch eine Ferndiagnose und Fernwartung von Maschinen und Anlagen mit einschließen. Dazu wird über eine Telekommunikationsleitung (z. B. über Internet) wird der aktuelle Zustand einer Steuerung vom Betreiber in ein Simulationscenter beim Maschinenhersteller übertragen. Dort können dann anhand der vorhandenen Simulationsumgebung erste Diagnosen gestellt und Empfehlungen abgeleitet werden.

Der Ablauf der virtuellen Inbetriebnahme kann grundsätzlich in fünf Phasen eingeteilt werden (siehe Abbildung 2-2). Zunächst müssen alle erforderlichen Informationen beschafft, gesammelt und zusammengestellt werden. Neben der Systemspezifikation der Produktionsanlage sind vor allem auch die Spezifikationen der verbauten Komponenten Grundlage für die Modellbildung. Die Informationen liegen häufig nur in Papierform vor, wodurch ein großer manueller Aufwand entstehen kann. Aus diesen Informationen muss dann von Hand das

Simulationsmodell der Produktionsanlage erzeugt werden. Hierzu werden aus den Informationen in speziellen Softwareprogrammen Modelle der Produktionsanlage entwickelt, die das Verhalten möglichst detailgetreu abbilden. In der dritten Phase muss der Teststand aufgebaut und gemäß des gewählten Ansatzes (siehe Kapitel 3.1) konfiguriert werden. Erst wenn die Simulationsumgebung zur Verfügung steht, können die Simulationsmodelle auf Fehler getestet werden, denn Fehler in den Simulationsmodellen können fatale Folgen haben. Es kann z. B. passieren, dass korrekte Programme aufgrund falscher Modelle geändert werden, damit korrekte Testergebnisse erreicht werden. Diese Änderungen verursachen dann erst im Rahmen der realen Inbetriebnahme Fehler, die dann weitreichende Konsequenzen (z. B. Folgefehler) nach sich ziehen können. Deshalb kann erst nach einem Test der Simulationsmodelle mit der eigentlichen virtuellen Inbetriebnahme begonnen werden. Damit können Steuerungsprogramme getestet und vorhandene Fehler behoben werden. Für einen erfolgreichen Test der Software sind vor allem eine Teststrategie und Testprotokolle notwendig, um eine annähernde Vollständigkeit der Testdurchführung garantieren zu können.



*Abbildung 2-2: Skizzierung der einzelnen Phasen der virtuellen Inbetriebnahme*

Nach einer korrekten Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme kann die Software in den logischen Abläufen als fehlerfrei betrachtet werden und muss vor Ort nur noch den Gegebenheiten (z. B. Adressierung) angepasst werden.

## 2.3 Defizite und Handlungsfelder

Die virtuelle Inbetriebnahme bietet viele Chancen, um die Entwicklungs- und Inbetriebnahmezeit einer Produktionsanlage deutlich zu verkürzen. Allerdings werden im Folgenden auch Defizite des bisherigen Vorgehens aufgezeigt, die ein großes Potenzial für Verbesserungen erkennen lassen:

### Datenmanagement

Für eine schnelle Informationsbeschaffung und -auswertung ist ein *transparentes und konsistentes Datenmanagement* in den Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen der Unternehmen erforderlich. Daher ist für die Datenverwaltung der Einsatz entsprechender Software unerlässlich und auch weit verbreitet. Derartige Tools bieten jedoch mittlerweile mehr Unterstützung als die reine Verwaltung der CAD-Geometrien an. Es können in den Tools der neueren Generation auch Daten, die für die Softwareentwicklung oder auch für die Simulation von Bedeutung sind, hinterlegt werden. Eine wichtige Herausforderung ist hierbei, eine geeignete Datenstruktur für das jeweilige Unternehmen zu entwickeln, um möglichst verlustfrei und aufwandsarm die Daten wiederverwenden zu können.

Neben dem technischen Datenmanagement sind vor allem auch definierte innerbetriebliche Prozesse für eine konsistente Datenverwaltung unabdingbar. Beispielsweise tritt in vielen Unternehmen häufig der Umstand auf, dass bei der Inbetriebnahme gewonnene Erkenntnisse und Ergebnisse nicht an die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen vermittelt werden und sich somit Fehler über mehrere Inbetriebnahmen wiederholen. Dies lässt sich meist auf den enormen Zeitdruck zurückführen, unter dem das Inbetriebnahmepersonal steht. Durch ein definiertes Review nach einer Inbetriebnahme mit den involvierten Mitarbeitern der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen könnten derartige Fehler schnell und dauerhaft beseitigt und im Datenmanagement gespeichert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Verbesserung des Datenmanagements hinsichtlich der virtuellen Inbetriebnahme eingegangen, definierte innerbetriebliche Prozesse für eine konsistente Datenhaltung stehen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit.

### Modellerstellung

Die *Modellerstellung* nimmt bei der virtuellen Inbetriebnahme eine Schlüsselfunktion ein. Bislang werden alle für die virtuelle Inbetriebnahme benötigten Modelle von Hand entwickelt. Dieses Vorgehen bedeutet schon bei kleinen Anlagen einen sehr zeitaufwendigen Prozess, der schnell die Wirtschaftlichkeit der virtuellen Inbetriebnahme in Frage stellen kann. Im Detail bedeutet die Modellerstellung derzeit, dass ein Spezialist die Daten aus den Spezifikationen der Produktionsanlage und den verbauten Komponenten sammeln muss. Im Anschluss entwickelt er dann mit geeigneten Softwaretools das virtuelle Modell, mit dem die Steuerung dann mittels eines Feldbusses verbunden wird. Neben der Wirtschaftlichkeit ist die Fehleranfälligkeit ein weiteres großes und zeitintensives

Problem. Da die Simulationsmodelle von Hand ohne direkten Zugriff auf die aktuellen Datenbasen aus der Entwicklung und Konstruktion erstellt werden, sind Fehler bei der Entwicklung des virtuellen Modells der Produktionsanlage aufgrund von Änderungen fast unvermeidbar. Dies bedeutet, dass auch die Simulationsmodelle vor der virtuellen Inbetriebnahme getestet werden müssen, was einen zusätzlichen Aufwand erfordert, weil Fehler in Simulationsmodellen nur sehr schwer zu finden sind. Diese Art von Fehlern führt unweigerlich zu inkorrekten Testergebnissen und somit eventuell auch zu fehlerverursachenden Änderungen in der Steuerungssoftware.

Es existieren bereits erste Ansätze für die Generierung von Verhaltensmodellen für Produktionsanlagen, jedoch wird eine automatisierte Erstellung des Materialflussmodells bislang eher vernachlässigt. Darüber hinaus sind derzeit entwickelte Materialflussmodelle von der Aussagekraft her beschränkt, weil es sich um rein logische Modelle handelt, d. h. die Geometrie und die Materialeigenschaften der Produktionsanlage bleiben unberücksichtigt. Die Erstellung eines aussagekräftigen Materialflussmodells ist Kern dieser Arbeit und wird in den weiteren Kapiteln detailliert beschrieben.

### **Interaktion**

Unter *Interaktion* ist bei der virtuellen Inbetriebnahme die Bedienung der Simulationsumgebung durch einen Spezialisten zu verstehen. Hierbei werden, um verschiedene Testfälle nachzustellen, sowohl Aktoren als auch Sensoren manuell in der Simulationsumgebung durch Setzen bestimmter Bits ausgelöst. Dieses Vorgehen erweist sich als sehr zeitintensiv, weil hierfür die einzelnen Belegungen aus den Spezifikationen nachgelesen und angewendet werden müssen. Eine Lösung des Problems wäre, die möglichen Funktionen eines Aktors oder eines Sensors nicht nur im Verhaltensmodell, sondern auch im 3-D-Modell abzubilden, um dort intuitiv die Testfälle nachstellen zu können. Darüber hinaus könnten auch die Interaktionsmethoden der VR dafür genutzt werden und zum Beispiel das Auslösen einer Lichtschranke durch einfaches „Greifen“ in den Auslösebereich mit einem Datenhandschuh nachstellen. Diese Verbesserung der Interaktion verspricht ein großes Zeiteinsparungspotenzial, ist aber nicht Kern dieser Arbeit und wird deshalb nur knapp behandelt.



## 3 Grundlagen und Stand der Technik

### 3.1 Allgemeines

Dieses Kapitel umfasst die Grundlagen und den Stand der Technik im Bereich der virtuellen Inbetriebnahme und der Physiksimulation sowie in den relevanten Themen der VR.

Der Ansatz der virtuellen Inbetriebnahme, die bislang nach der Entwicklung zum Test der Steuerungssoftware eingesetzt wird, kann auch auf die eigentliche Entwicklung übertragen werden. Hierzu wird schon während der Entwicklung eine Simulationsumgebung für die Softwareentwickler aufgebaut, mit welcher der programmierte Steuerungscode getestet werden kann. Die virtuelle Inbetriebnahme kann deshalb auch als Basistechnologie für eine integrierte Entwicklung der Steuerungssoftware angesehen werden und wird deshalb im Abschnitt 3.2 genauer beleuchtet.

In dieser Arbeit wird eine Methode zum Einsatz von Physikmodellen für die integrierte Entwicklung von Steuerungssoftware beschrieben. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Methode ist die Abbildung des Materialflusses in einer Produktionsanlage mithilfe einer Physiksimulation. Die Grundlagen der Physiksimulation werden im Abschnitt 3.3 dargestellt.

Mithilfe der VR-Technologien kann die Interaktion des Softwareentwicklers bei den Tests der Steuerungssoftware verbessert und somit die Akzeptanz bei der Testdurchführung gesteigert werden. Ein Überblick über die VR-Technologien, die hierfür zur Verfügung stehen, wird im Abschnitt 3.4 gegeben.

### 3.2 Virtuelle Inbetriebnahme

#### 3.2.1 Grundlagen

Die Aufgaben und der Ablauf der virtuellen Inbetriebnahme sind im Abschnitt 2.2 schon ausführlich dargelegt worden. Bislang wurde die virtuelle Inbetriebnahme erst am Ende der Entwicklungsphase durchgeführt, weil der Aufwand für eine manuelle Modellerstellung während der Entwicklung als zu hoch angesehen wurde. Grundsätzlich ist es auch denkbar, den Ansatz der Simulationsumgebung während des Betriebes der Anlage beizubehalten, um Veränderungen in der

Software testen und somit den damit verbundenen Wiederanlauf verkürzen zu können.

Für den Aufbau einer Simulationsumgebung für die virtuelle Inbetriebnahme existieren zwei verschiedene Ansätze (siehe Abbildung 3-1), Software-in-the-Loop (SIL) bzw. Hardware-in-the-Loop (HIL). Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

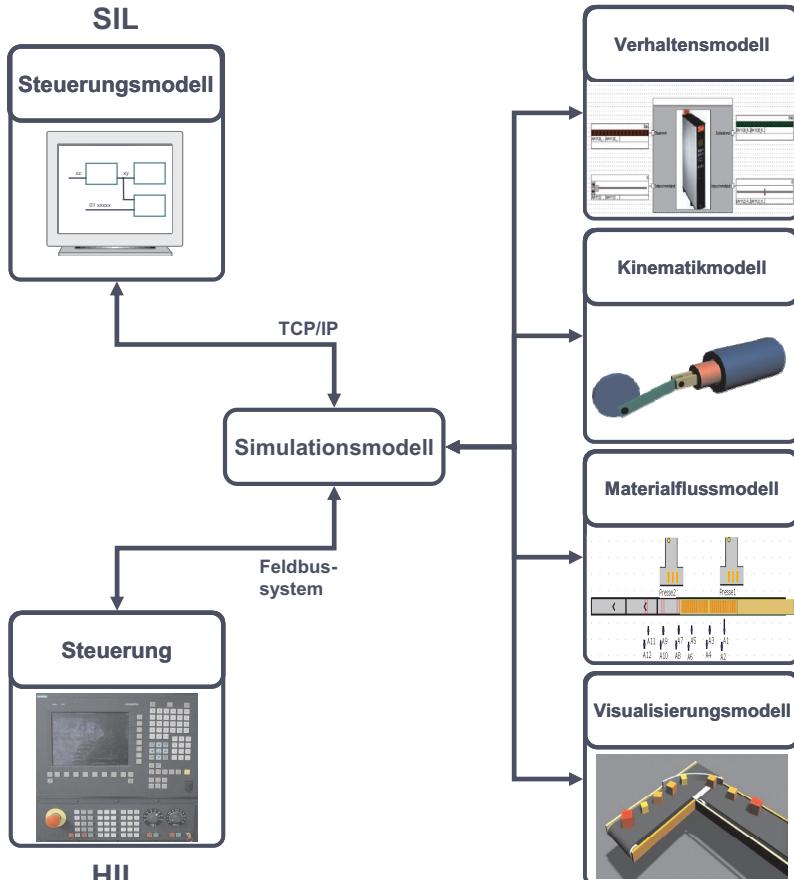


Abbildung 3-1: Systemaufbau für den SIL- und HIL-Ansatz der virtuellen Inbetriebnahme

#### 3.2.2 Software-in-the-Loop

BENDER et al. 2005b definieren SIL als die „Ausführung der Steuerungssoftware eines technischen Systems im Verbund mit einer Umgebungssimulation auf einem Host-Rechner, d. h. nicht der Zielhardware.“ Dies kann laut BENDER et al. 2005b „entweder durch Compilieren der Software für das Hostsystem oder durch Einsatz eines Software-Emulators geschehen“. Im Aufbau einer Simulationsumgebung gemäß dem SIL-Ansatz wird die Steuerung der Produktionsanlage auf einem PC mithilfe einer Steuerungssimulation abgebildet, die über eine TCP/IP-Schnittstelle (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) mit dem Simulationsmodell verbunden ist. Bei kleineren Systemen bzw. wenn der zu simulierende Anteil der Steuerungstechnik nicht zu groß ist, kann die SIL-Simulation ohne Einschränkungen auch an einem Rechner durchgeführt werden. Nach Aufbau der Testumgebung wird das Steuerungsprogramm in der Steuerungssimulation ausgeführt. Die Ergebnisse können dann am virtuellen Modell überprüft werden. Der SIL-Ansatz hat den Vorteil, dass keine Steuerungshardware während der Entwicklung und Testphase erforderlich ist bzw. die Zielhardware während der Entwicklung noch nicht endgültig feststehen muss. Erst nach der Simulation wird der Steuerungscode in das Format der jeweiligen Steuerung konvertiert und übertragen. Die SIL-Simulation wird in der Literatur oft auch als Vollsimulation bezeichnet.

#### 3.2.3 Hardware-in-the-Loop

Im Gegensatz zur SIL-Simulation wird bei der HIL-Simulation die reale Steuerungstechnik eingebunden. Hierfür wird die Steuerung (z. B. SPS) über einen Feldbus (z. B. Profibus) an ein virtuelles Modell der Produktionsanlage angeschlossen, das die Befehle der Steuerung entgegennimmt, bearbeitet und entsprechende Signale als Rückmeldungen zurücksendet. Dieser Ansatz wurde im Rahmen von Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) untersucht (ZÄH et al. 2004a). In weiteren Studien wurden die gewonnenen Forschungsergebnisse in der Praxis evaluiert und der Ansatz weiterentwickelt (MUNZERT et al. 2004, ZÄH et al. 2004b, ZÄH et al. 2004c, ZÄH et al. 2004e, WÜNSCH & ZÄH 2005a, 2005b).

Der Vorteil des HIL-Ansatzes ist die Möglichkeit der direkten Übernahme der Steuerungstechnik in die Produktionsanlage nach Abschluss der virtuellen Inbetriebnahme, d. h. die Steuerungstechnik kann von der Simulationsumgebung getrennt und dann sofort an die reale Produktionsanlage angeschlossen werden.

### **3.2.4 Modellbildung für eine virtuelle Inbetriebnahme**

#### **3.2.4.1 Verhaltensmodell**

Die Erstellung eines Verhaltensmodells, welches das Funktionsverhalten der zu simulierenden Produktionsanlage exakt abbildet, ist ein schwieriger Prozess, der ein gutes Verständnis der Anlage sowie steuerungstechnische Kenntnisse erfordert. Das Modell muss deshalb von einem Simulationsexperten angefertigt werden, um anschließend eine korrekte Testdurchführung garantieren zu können.

Dieser Prozess ist derzeit nur schwer zu automatisieren, weil die erforderlichen Daten über die verbauten Komponenten der Produktionsanlage in vielen verschiedenen Datenformaten bzw. oft auch nur in Papierform vorliegen. Der Simulationsexperte muss daher manuell auf die einzelnen Informationsquellen zurückgreifen und daraus mit der Unterstützung einer entsprechenden Software (z. B. WinMod® von MEWES 2007 oder SINUMERIK Machine Simulator von SIEMENS 2007) schrittweise ein Verhaltensmodell entwickeln.

Derzeit wird an ersten Methoden gearbeitet, die eine teilautomatisierte Erstellung des Verhaltensmodells ermöglichen (GRÄTZ 2006, REINHART et al. 2007). Diese Ansätze setzen jedoch eine datenbankbasierte Datenverwaltung voraus, die bislang nur in wenigen Unternehmen konsequent umgesetzt ist.

#### **3.2.4.2 Kinematikmodell**

Viele Teile in einer Produktionsanlage sind aufgrund der verschiedenen Bearbeitungsstationen und -vorgänge sowie den verbindenden Fördereinrichtungen beweglich. Dieses Bewegungsverhalten der Produktionsanlage wird im Kinematikmodell der Maschine hinterlegt, damit auch in der Simulation genau die Bewegungen zugelassen sind, die in der Realität durch die Konstruktion vorgegeben sind.

Diese Kinematisierung des Simulationsmodells wird mithilfe von Softwaretools (z. B. eM-Workplace der Firma Siemens AG) im Visualisierungsmodell der Produktionsanlage hinterlegt. Hierzu werden die beweglichen Teile mit einem möglichen Verfahrweg (Länge, Richtung) parametrisiert. Der Schritt der Kinematisierung wird bereits standardmäßig durchgeführt. Daher ist er an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

### **3.2.4.3 Materialflussmodell**

Um den Ansatz der virtuellen Inbetriebnahme auf den Anlagenbau transferieren zu können, muss im virtuellen Modell auch der Materialfluss, der bei Werkzeugmaschinen eine eher untergeordnete Rolle spielt, simuliert werden. Der Materialfluss einer Produktionsanlage ist ein Kernelement, weil durch ihn Sensoren ausgelöst werden, die über eine Meldung an die Steuerung direkt Einfluss auf das Bewegungsverhalten einer Anlage nehmen (z. B. Lichtschranke an einem Förderband).

Die Simulation des Materialflusses kann derzeit mithilfe von kommerziellen Ablaufsimulationssystemen (z. B. eM-Plant von der Siemens AG oder Quest von Delmia) behelfsmäßig gelöst werden, die eigentlich zur Planung der logistischen Abläufe in einer Produktionsanlage gedacht sind. Es kann deshalb nur ein logischer Materialfluss simuliert werden, der nicht auf den realen Geometriedaten aus der Konstruktion der Produktionsanlage, sondern auf einem logischen Ersatzmodell basiert (REINHART & SPITZWEG 2007). Dies hat auch zur Folge, dass Szenarien, bei denen das Transportgut über antriebslose Fördereinrichtungen (z. B. Rutschsen) transportiert wird, nicht simuliert werden können. Auch ein etwa auftretender Stau des Transportgutes kann derzeit mit den vorhandenen Simulationsprogrammen nicht geometrisch korrekt abgebildet werden. Darüber hinaus ist eine maschinentreue Simulation der Sensorik aufgrund der fehlenden 3-D-Überprüfung der Geometrien des Simulationsmodells in den meisten Fällen nicht möglich. Diese Einschränkungen mindern die Aussagekraft des Materialflussmodells für eine virtuelle Inbetriebnahme deutlich.

### **3.2.4.4 Visualisierungsmodell**

Das Visualisierungsmodell ist für eine virtuelle Inbetriebnahme nicht zwingend erforderlich, jedoch ist es für das Verständnis der Produktionsanlage meist sehr nützlich, um die komplexen Abläufe einfach darstellen zu können (SPATH & LANDWEHR 2000, ZÄH et al. 2004b, SPATH 2005). Die am Markt vorhandenen Ablaufsimulationssysteme bieten häufig eine 3-D-Ansicht an, welche jedoch manuell der Anlage entsprechend mit Symbolen nachmodelliert werden muss und darüber hinaus nur in sehr beschränktem Umfang ruckfrei mit 3-D-Animation visualisiert werden kann. Hierbei sind die Grenzen der Modellgrößen schon bei wenigen Objekten und bei sehr niedrigen Taktzeiten einer Produktionsanlage erreicht.

Die Komplexität des Visualisierungsmodells muss daher bei größeren Produktionsanlagen reduziert werden. Hierzu wird das Modell vereinfacht, indem es auf die simulationsrelevanten Teile reduziert wird oder komplizierte Bauteile mit vielen Polygonen vereinfacht dargestellt werden. Für diesen Prozess stehen verschiedene Softwaretools zur Verfügung.

#### **3.2.5 Zusammenfassung**

Alle Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme haben das Ziel, den Steuerungscode vor der eigentlichen Inbetriebnahme zu testen, um wertvolle Zeit beim Anlauf einer Produktionsanlage zu sparen. Die beschriebenen Konzepte unterscheiden sich im Wesentlichen auf der Steuerungsseite, d. h. die Erstellung der Simulationsmodelle ist für beide Ansätze identisch. Während bei der HIL-Simulation die reale Steuerung an das Simulationsmodell der Maschine oder Anlage gekoppelt wird, wird bei der SIL-Simulation ein Steuerungsmodell, das an einem PC die Steuerungshardware emuliert, zur Simulation verwendet. Der SIL-Ansatz ist kostengünstiger, weil die reale Hardware während der virtuellen Inbetriebnahme nicht zur Verfügung stehen muss. Allerdings muss die Hardware für den Betrieb der Produktionsanlage spätestens nach der virtuellen Inbetriebnahme gekauft werden, so dass die Investition um wenige Tage oder Wochen hinausgezögert werden kann. Der Kostenvorteil ist somit sehr gering. Für den SIL-Ansatz spricht die Möglichkeit, mehrere Teststände ohne großen Kostenaufwand aufzubauen, um parallel testen zu können, was jedoch eine gute Verwaltung der verschiedenen Softwarestände erfordert. Beim HIL-Ansatz wäre für eine Parallelisierung die Anschaffung der Steuerungstechnik für jeden Teststand einzeln notwendig.

Eine wesentliche Einschränkung bei den aktuellen Ansätzen der virtuellen Inbetriebnahme ist die Abbildung des Materialflusses mithilfe eines logischen Modells, das nur auf logischen Verkettungen, jedoch nicht auf den Geometrien der Produktionsanlage bzw. der Werkstücke basiert. Dies hat zur Folge, dass die Modelle an vielen Stellen nicht der realen Produktionsanlage entsprechen bzw. viele Testfälle nicht korrekt nachgestellt werden können.

Einen guten Überblick über die verschiedenen Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme für automatisierte Produktionsanlagen gibt WÜNSCH 2008. Dort werden darüber hinaus auch die Wirtschaftlichkeit und die Skalierbarkeit beleuchtet.

## 3.3 Physiksimulation

### 3.3.1 Allgemeines

Die VDI-Norm 3633 (VDI-RICHTLINIE 1993) definiert Simulation als „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ Bei jeder Art von Simulation wird eine möglichst realitätsnahe Abbildung des zu simulierenden Systems angestrebt, um sehr konkrete Aussagen über das Verhalten treffen zu können, die sich im späteren Betrieb bewahrheiten. STETTER 1993 stellte fest, dass durch die Integration physikalischer Effekte (z. B. Reibung oder Gravitation) der Realitätsbezug der Simulationsergebnisse erhöht werden kann. Er sieht darin auch die Möglichkeit, „freie“ Bewegungen der Handhabungsgüter (Rutschen, Kippen, Fallen) zu erfassen. In seinen Arbeiten integrierte er erste physikalische Effekte in die Simulation, um die Auswirkungen auf die Effizienz bei der Simulation von Industrierobotern zu betrachten.

Das weite Gebiet der Physiksimulation wird im Folgenden auf den für diese Arbeit relevanten Teil eingegrenzt.

Nach LENNERZ 2002 kann die Beschreibung des dynamischen Verhaltens (siehe Abbildung 3-2) von Objekten in nicht-kontaktinduzierte und kontaktinduzierte Einflüsse eingeteilt werden. Nicht-kontaktinduzierte Einflüsse können mithilfe von Newton-Euler-Differenzialgleichungssystemen berechnet werden. Bei kontaktinduzierten Einflüssen muss zwischen starren und deformierbaren Körpern unterschieden werden. Während kontaktinduzierte Einflüsse bei deformierbaren Körpern nur mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet werden können, kann dies bei starren Körpern durch verschiedene Ansätze aus der Starrkörpersimulation erfolgen. Im Vordergrund der Berechnungen stehen bei der Starrkörpersimulation eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse sowie die Berechnungsgeschwindigkeit, um eine Interaktion zu ermöglichen. Bei der FEM liegt der Anspruch einer hohen Genauigkeit im Fokus der Berechnungen. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Anwendung der Starrkörpersimulation für die echtzeitfähige Simulation von Produktionsanlagen.

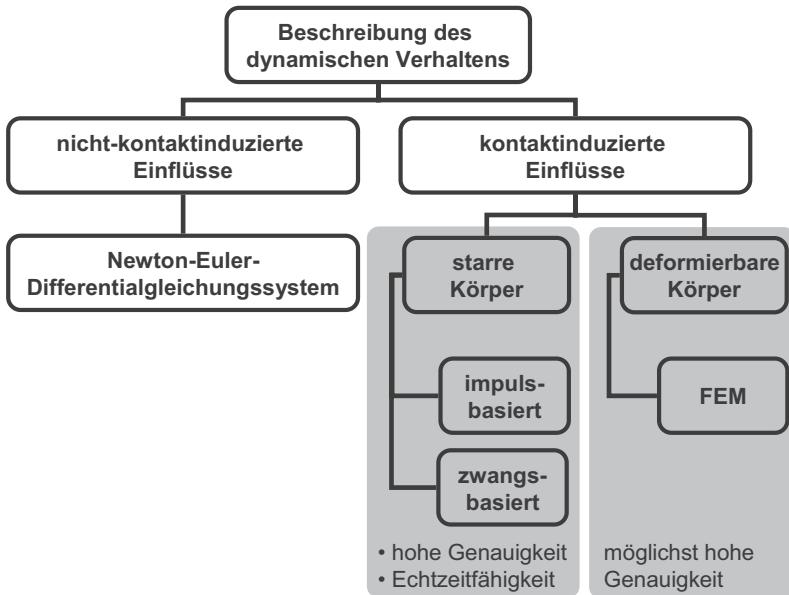


Abbildung 3-2: Beschreibung des dynamischen Verhaltens nach LENNERZ 2002

Die Physiksimulation, insbesondere die Starrkörpersimulation, besteht in jedem Simulationsschritt aus den beiden Phasen Kollisionserkennung und Kollisionsbehandlung (EBERLY 2004), die sich wiederum in einzelne Subphasen gliedern (siehe Abbildung 3-3).

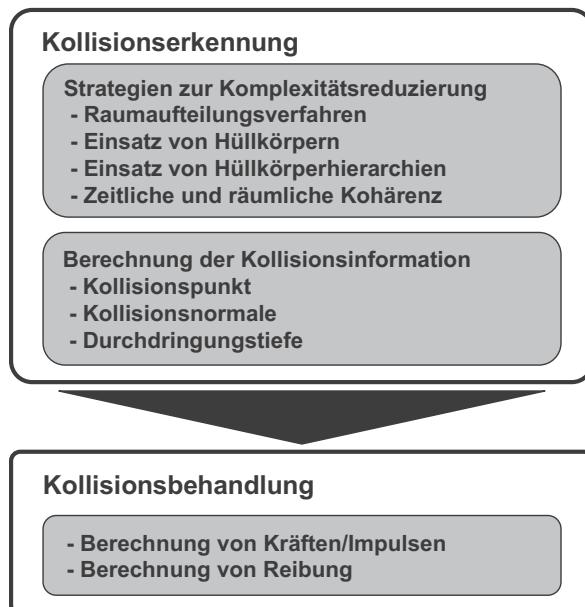


Abbildung 3-3: Zeitlicher Ablauf der Physiksimulation mit den beiden Phasen  
Kollisionserkennung und Kollisionsbehandlung

### 3.3.2 Kollisionserkennung

Die 3-D-Kollisionserkennung von virtuellen Objekten spielt in vielen Bereichen der Simulation (z. B. Montagesimulation) eine wichtige Rolle. Um die Kollision zwischen zwei Objekten in einer virtuellen Szene erkennen zu können, müssen die Geometrie, die Lage und die Orientierung der einzelnen Objekte in jedem Simulationsschritt bekannt sein bzw. berechnet werden können.

Einen guten Überblick über die Grundlagen und den Stand der Technik der 3-D-Kollisionserkennung geben LIN & GOTTSCHALK 1998, ECKSTEIN 1999, ZACHMANN 2000, BANERJEE & ZETU 2001, STEFFAN 2001, REGGIANI et al. 2002 und VAN DEN BERGEN 2004.

### 3.3.3 Strategien zur Komplexitätsreduzierung

Die geometrische Beschreibung der Objekte ist die Grundlage für das Berechnungsverfahren für Kollisionen. Von dieser hängt auch die Performanz der Kollisionserkennung ab. LIN & GOTTSCHALK 1998 teilen 3-D-Modelle in polygonale und nicht-polygonale Modelle ein (siehe Abbildung 3-4). Effiziente Algorithmen für die Kollisionsberechnung, die für eine echtzeitfähige Simulation erforderlich sind, existieren derzeit vor allem für polygonale Modelle. Auch aus diesem Grund haben sich polygonale Modelle in Simulationsanwendungen durchgesetzt.

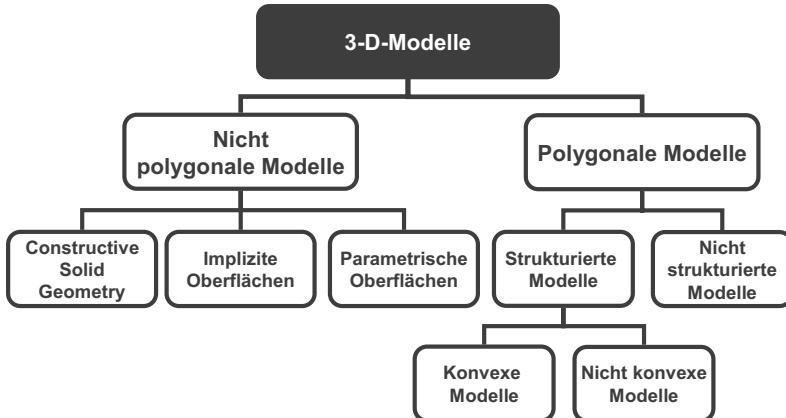


Abbildung 3-4: Einteilung von 3-D-Modellen nach Lin & Gottschalk 1998

Der naive Ansatz der Kollisionserkennung ist die paarweise Überprüfung von Kollisionen eines jeden Objektes mit jedem anderen Objekt im Raum. Dies bedeutet für die Komplexität bei  $n$  Objekten:

$$\text{Anzahl der Rechenoperationen} = \frac{n * (n - 1)}{2} = O(n^2) \quad (1)$$

Um den Aufwand weiter zu reduzieren, werden die Objekte in dynamische und statische Objekte aufgeteilt, damit die statischen Objekte nicht mehr auf Kollision untereinander getestet werden müssen. Die Anzahl der möglichen Kollisionen sinkt somit bei  $n$  dynamischen und  $m$  statischen Objekten auf:

$$\text{Anzahl der Rechenoperationen} = \binom{n}{2} + n * m \quad (2)$$

Trotz dieser ersten Einschränkung ist die Kollisionsrechnung für die meisten Anwendungen noch nicht echtzeitfähig, so dass eine weitere Komplexitätsreduzierung erforderlich ist. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze und Verfahren, die kombiniert werden können, um die Geschwindigkeit der Berechnung weiter zu steigern.

Der meistverbreitete Ansatz für eine echtzeitfähige Kollisionserkennung ist der Zwei-Phasen-Algorithmus (WATT 2002). Das Vorgehen gliedert sich hierbei in eine „weite“ Phase („Broad Phase“) und in eine „nahe“ Phase („Narrow Phase“). In der „weiten“ Phase werden die möglichen Kollisionspaare gefunden bzw. Objekte, die nicht miteinander kollidieren können, aus der Kollisionsberechnung ausgeschlossen. In der „nahen“ Phase werden die Kollisionspunkte ermittelt, sofern diese überhaupt vorhanden sind.

Für die „weite“ Phase gibt es viele verschiedene Ansätze und Verfahren, von denen an dieser Stelle die wichtigsten näher erläutert werden:

### Raumaufteilungsverfahren

Die Idee der Raumaufteilungsverfahren ist einfach. Der Raum der Szene wird zunächst in gleich große Zellen unterteilt (siehe Abbildung 3-5). Dann wird jede Zelle einzeln betrachtet. Wenn eine Zelle mehr als ein Objekt besitzt, könnte eine Kollision vorliegen und es wird im Anschluss eine genauere Kollisionsüberprüfung durchgeführt. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren ist, die geeignete Größe der Zellen zu finden, um eine schnelle Berechnung durchführen zu können. Dieser Algorithmus ist vor allem für solche Szenarien geeignet, in denen alle Objekte ungefähr die gleiche Größe aufweisen und nur wenige Objekte existieren.

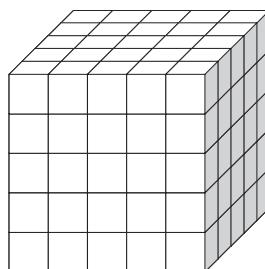
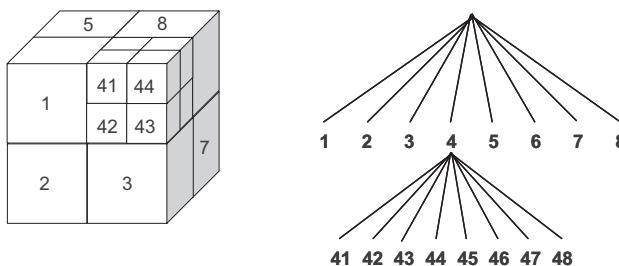


Abbildung 3-5: Gleichmäßige Raumaufteilung

Alternativ kann der Raum auch in einen Oktonärbaum zerlegt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Wahl der Zellengröße wegfällt. Allerdings kann das Umsortieren des Baumes bei sich bewegenden Objekten sehr aufwendig werden. Der Oktonärbaum ist aus dem Quaternärbaum entstanden, der für eine schnelle Berechnung von Kollisionen in 2-D eingesetzt wird. Der Oktonärbaum wird rekursiv aufgesetzt und kann somit bis zu einem beliebigen Genauigkeitsgrad eine Szene auflösen. In Abbildung 3-6 wird die rekursive Aufteilung des kubischen Raumes einer Szene schematisch dargestellt. Bei sich bewegenden Objekten muss der Oktonärbaum in jedem Zeitschritt angepasst werden. Diese Aktualisierung wirkt sich negativ auf die Performanz aus.



*Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Raumaufteilung mithilfe eines Oktonärbaumes*

Ein weiteres Verfahren zur Raumaufteilung einer Szene ist die Binary-Space-Partitionierung (BSP). Bei der BSP wird der gesamte Raum zunächst durch eine Teilungsebene in zwei Teile gegliedert. Daraufhin werden die entstandenen zwei Halbräume wieder geteilt und das Verfahren auf die wieder neu entstandenen Räume angewendet. So wird nach und nach der Raum rekursiv immer weiter unterteilt. Jeder innere Knoten des Binärbaumes repräsentiert somit eine Teilungsebene, während die zwei Unterbäume eines inneren Knoten jeweils einen Unterraum repräsentieren. Das Ende der Unterteilung ist dann erreicht, wenn in einem Teilraum nur mehr ein geometrisches Objekt existiert. Die Daten der Ausgangsmenge können entweder ausschließlich in den Blättern des Baumes oder sowohl in den Blättern als auch in den inneren Knoten gespeichert sein. Der BSP-Baum wird dann *blattbasiert* bzw. *knotenbasiert* genannt. In Abbildung 3-7 ist der schrittweise Aufbau eines BSP-Baumes zu sehen.

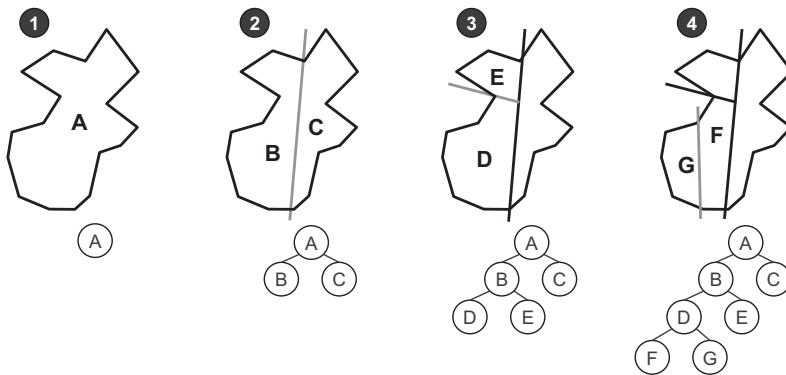


Abbildung 3-7: Schrittweiser Aufbau eines BSP-Baumes durch Binary-Space-Partition

### Einsatz von Hüllkörpern (engl. Bounding Volumes)

Die grundlegende Idee des Einsatzes von Hüllkörpern ist die Tatsache, dass eine Kollision zwischen zwei Objekten nur dann eintreten kann, wenn sich auch die zugehörigen Hüllkörper schneiden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass eine Überprüfung der Kollision der Hüllkörper die Aussage liefern kann, ob eine genauere Überprüfung einer Kollision der beiden Objekte erforderlich ist. Aufgrund der einfachen Geometrie der Hüllkörper führt dieses Verfahren zu einer deutlichen Reduzierung des Rechenaufwandes gegenüber der paarweisen Überprüfung von Kollisionen eines jeden Objektes mit jedem anderen Objekt.

Ein Hüllkörper muss nach WATT 2002 zwei wichtige Anforderungen erfüllen. Er muss zum einen das Objekt „auf wirksame Art und Weise“ einschließen, d. h. das Objekt soll den Hüllkörper möglichst ausfüllen, damit wenig leerer Raum zwischen Hüllkörper und Objekt entsteht. Zum anderen soll der Hüllkörper einen einfachen Schnittpunkttest erlauben, so dass die Rechenoperationen möglichst einfach und schnell zu lösen sind.

In Abbildung 3-8 sind verschiedene Hüllkörper abgebildet, die häufig bei der Kollisionserkennung eingesetzt werden. Diese werden im Folgenden näher beschrieben:

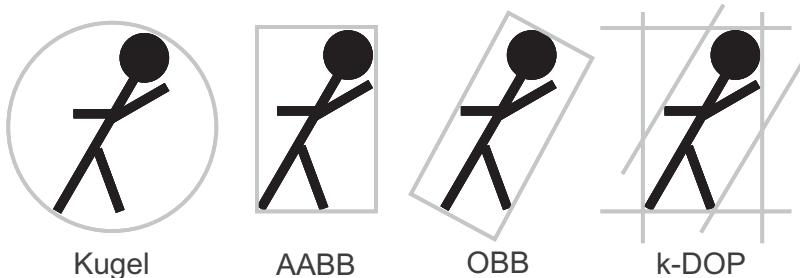


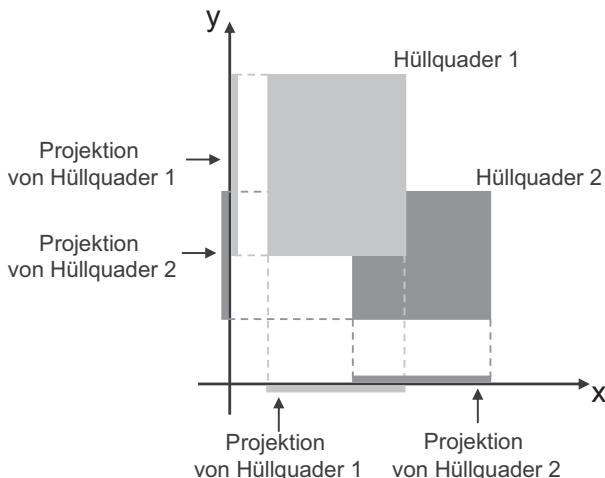
Abbildung 3-8: Verschiedene Hüllkörper zur schnelleren Kollisionserkennung

### Kugel

Eine Kugel – in der Literatur oft auch als Sphäre bezeichnet – ist als Hüllkörper für komplexe Objekte nur bedingt geeignet. Zwar ist der Kollisionstest sehr einfach, weil nur berechnet werden muss, ob der Abstand der Mittelpunkte zweier Kugeln kleiner als die Summe der Radien der beiden Kugeln ist, aber auf der anderen Seite ist die Fülleffizienz in der Regel sehr niedrig, was in der Praxis zu vielen unnötigen Kollisionsberechnungen führt. Ein Vorteil einer Kugel als Hüllkörper ist das Verhalten bei Rotation des Objektes, weil die Kugel rotations-symmetrisch ist und somit bei ihrer Verwendung keine Transformation berechnet werden muss.

### Axis Aligned Bounding Box (AABB)

Als AABB wird ein Hüllquader bezeichnet, dessen Oberflächennormalen mit den Achsen des Koordinatensystems übereinstimmen. Diese Art Hüllquader ist aufgrund dieser Ausrichtung einfach für jedes Objekt zu erstellen. Der Kollisionstest wird durch Projektion der AABBs auf die Koordinatenachsen durchgeführt (siehe Abbildung 3-9). Wenn sich die Projektionen auf allen Koordinatenachsen überlappen, liegt eine Kollision vor und es muss der Kollisionspunkt berechnet werden.



*Abbildung 3-9: Kollisionsüberprüfung bei AABBs durch Projektion auf die Koordinatenachsen (Vereinfachte 2-D-Darstellung)*

Allerdings weisen die AABBs eine relativ schlechte Fülleffizienz auf, d. h. es gibt in der Regel sehr viel leeren Raum zwischen den Objekten und deren Hülle. Dies führt dazu, dass häufig Kollisionstests durchgeführt werden müssen, obwohl keine Kollision vorliegt.

#### Oriented Bounding Box (OBB)

Im Gegensatz zur AABB ist die OBB ein gerichteter Quader, so dass eine relativ hohe Fülleffizienz erreicht wird und somit wenig unnötige Kollisionsberechnungen durchgeführt werden müssen. Die Erstellung einer OBB ist wesentlich rechenintensiver, weil sie so gedreht werden muss, dass sie möglichst eng am Objekt anliegt. Auch die Kollisionsberechnung ist etwas komplizierter, da die einfache Projektion auf die Koordinatenachsen wie bei den AABBs keine Kollisionsaussage liefert (siehe Abbildung 3-10).

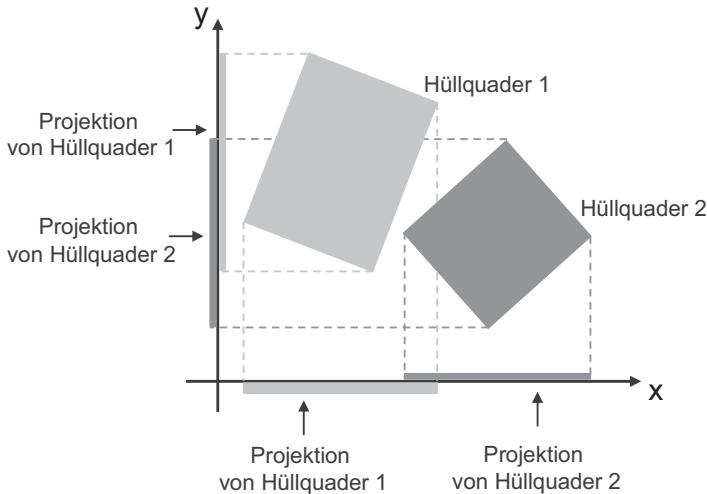


Abbildung 3-10: Beispiel einer unmöglichen Kollisionsüberprüfung bei OBBs durch Projektion auf die Koordinatenachsen (Vereinfachte 2-D-Darstellung)

Zur Kollisionsberechnung wird deshalb das Separating-Axis-Theorem genutzt, das aussagt, dass es für zwei konvexe Polyeder, die sich weder berühren noch schneiden, eine Trennachse gibt, auf der die Projektionen der OBBs sich nicht überlappen (siehe Abbildung 3-11). Mithilfe des Theorems ist eine Kollisions-überprüfung mit moderatem Aufwand möglich.

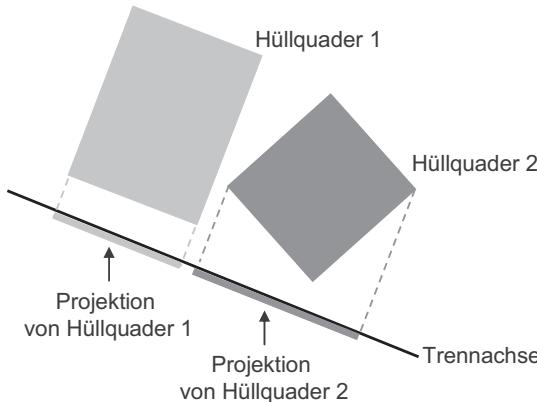


Abbildung 3-11: Verwendung des Separating-Axis-Theorems für die Kollisionsüberprüfung bei OBBs

#### [k-discrete Oriented Polytop \(k-DOP\)](#)

Die begrenzenden Flächen eines  $k$ -DOP werden durch  $k$  Halbräume mit festen Orientierungen bestimmt. Man bezeichnet es deshalb auch als die Verallgemeinerung einer AABB. Aufgrund des Vorgehens bei der Erstellung mit festen Orientierungen können die Hüllkörper zum einen sehr schnell und bei nicht zu kleinem  $k$  auch mit großer Fülleffizienz erzeugt werden. Die Kollisionserkennung ist bei  $k$ -DOPs wesentlich einfacher als bei OBBs, da sie mittels Projektion auf die Richtungsachsen der  $k$  Halbräume durchgeführt werden kann. Dies setzt voraus, dass gleichartige  $k$ -DOPs verwendet werden. Ein Nachteil der  $k$ -DOPs liegt darin, dass bei Rotation des Objektes das  $k$ -DOP als Hüllkörper neu berechnet werden muss (AKENINE-MÖLLER & HAINES 2002).

#### Einsatz von Hüllkörperhierarchien

Da Hüllkörper in der Regel aufgrund der vielen Leerräume um das eigentliche Objekt für die Komplexitätsreduzierung bei der Kollisionserkennung nicht optimal sind (z. B. Kugel), schlagen RUBIN & WHITTED 1980 und WEGHORST et al. 1984 vor, eine Hierarchie von Hüllkörpern zur Annäherung an das eigentliche Objekt einzusetzen. Zur Speicherung der Hierarchie wird eine Baumstruktur verwendet. Es gibt zwei verschiedene Strategien, den Hierarchiebaum aufzubauen: entweder von unten nach oben (bottom up) oder von oben nach unten (top down). HUBBARD 1996 verwendet für eine sehr schnelle Kollisionsüberprüfung Hierarchien von Kugeln zur Annäherung von Polyedern. Der oberste Knoten des

Baumes ist hierbei die Hüllkugel des gesamten Objektes. In der darunterliegenden Baumebene wird das Objekt durch schon etwas genauere Hüllkugeln abgebildet. Je weiter nach unten man im Baum gelangt, desto kleiner werden die Kugeln, wodurch der Detaillierungsgrad beliebig verfeinert werden kann. Aufgrund der einfachen Kollisionsüberprüfung ist diese Methode sehr schnell in der Berechnung. Dasselbe Verfahren kann statt mit Kugeln auch mit anderen Hüllkörpern (AABB, OBB,  $k$ -DOP) durchgeführt werden.

#### **Zeitliche und räumliche Kohärenz**

Zusätzlich zu den beschriebenen Verfahren und Algorithmen kann die zeitliche und räumliche Kohärenz genutzt werden, um die Anzahl der notwendigen Tests zur Kollisionsüberprüfung weiter zu reduzieren.

Die zeitliche Kohärenz basiert auf der Tatsache, dass sich in den meisten Fällen von einem Zeitschritt zum nächsten nur geringe Änderungen ergeben. Es wird daher das Ergebnis des vorhergehenden Zeitschritts als Ausgangsbasis für die Berechnung genutzt (Frame-to-Frame-Kohärenz). Mithilfe des Sweep-and-Prune-Algorithmus (COHEN et al. 1995, PONAMGI et al. 1997) kann zum Beispiel der Rechenaufwand bestenfalls bis auf  $O(n)$  reduziert werden.

Bei der räumlichen Kohärenz besteht die Grundidee darin, weit voneinander entfernte Objekte, die in absehbarer Zeit nicht kollidieren werden, vorübergehend aus der Liste der möglichen Kollisionspaare zu nehmen und so den Rechenaufwand zu senken.

#### **3.3.4 Berechnung der Kollisionsinformation**

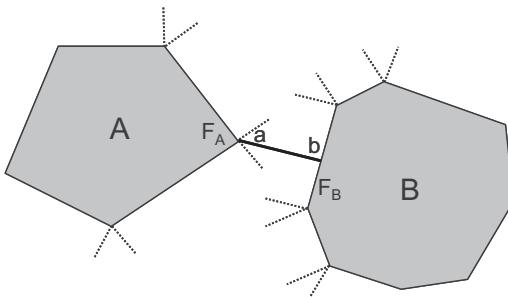
Die bisher beschriebenen Ansätze liefern die Aussage, dass es sehr wahrscheinlich zu einer Kollision zwischen zwei bestimmten Objekten gekommen ist. Im nächsten Schritt muss deshalb die genaue Kollisionsinformation (Kollisionspunkt, Kollisionsnormale, Durchdringungstiefe) berechnet werden, um anschließend auf die Kollision reagieren zu können, also die sogenannte Kollisionsbehandlung durchführen zu können.

Es existieren zwei grundlegende Algorithmen, um diese Information für den Fall der Kollision von zwei konvexen Polyedern zu berechnen. Nicht konvexe Polyeder können nach EHMANN & LIN 2001 in mehrere konvexe Polyeder geteilt werden, damit die Algorithmen zur Kollisionsberechnung von konvexen Polyedern angewendet werden können, die im Folgenden erläutert werden.

### Lin-Canny-closest-feature-Algorithmus

Um den Closest-feature-Algorithmus (LIN & CANNY 1991, LIN 1993) genauer beschreiben zu können, müssen zunächst einige Begrifflichkeiten erklärt werden. Unter einem *Feature* versteht man in diesem Zusammenhang einen Eckpunkt, eine Kante oder eine Seitenfläche eines Polyeders. Eine *Voronoi-Region* eines Features ist eine Region, innerhalb derer sich alle Punkte näher am jeweiligen Feature befinden, als an allen anderen Features.

Es sei angenommen, dass  $A$  und  $B$  zwei sich nicht schneidende Polyeder und  $a$  und  $b$  die am dichtesten zusammenliegenden Punkte zwischen den Features  $F_A$  von  $A$  und  $F_B$  von  $B$  sind. Wenn  $a$  und  $b$  die am dichtesten zwischen  $A$  und  $B$  liegenden Punkte sind, dann gilt  $a \in V(F_b)$  und  $b \in V(F_a)$ . Die Basis des Closest-feature-Algorithmus ist nun der Umkehrschluss dieser Aussage, d. h. wenn  $a \in V(F_b)$  und  $b \in V(F_a)$ , dann sind  $a$  und  $b$  die am dichtesten zueinanderliegenden Punkte der Polyeder  $A$  und  $B$  (siehe Abbildung 3-12).



$A, B$	Polyeder
$F_A, F_B$	Features der Polyeder A und B
$a, b$	Die zwei am dichtesten zueinanderliegenden Punkte der Features $F_A$ und $F_B$

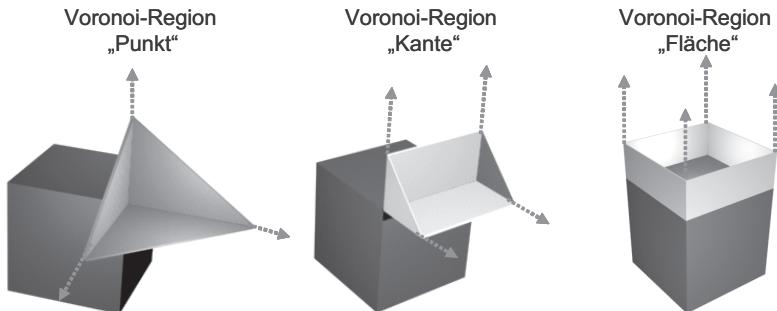
Abbildung 3-12: 2-D-Beispiel für Closest-feature-Algorithmus unter Verwendung der Voronoi-Region

Der Algorithmus, um die am dichtesten zusammenliegenden Punkte zu finden, geht wie folgt vor:

1. Die einander nächstgelegenen Punkte zwischen dem aktuellen Feature-Paar berechnen
2. Falls jeder Punkt in der Voronoi-Region des gegenüberliegenden Features liegt, wurden die dichtesten Punkte gefunden.
3. Ein oder beide Features aktualisieren und wieder zu Schritt 1 springen.

Das Aktualisieren eines Features bedeutet, im Falle des Features  $F_A$  und des darauf befindlichen Punktes  $a$  erst zu testen, bezüglich welcher begrenzenden Ebene der Voronoi-Region  $V(F_B)$  der Punkt  $a$  auf der falschen Seite liegt und dann als neues Feature  $F_A$  das benachbarte Feature auf der richtigen Seite der Ebene zu wählen.

In Abbildung 3-13 sind die Voronoi-Regionen von Polyedern im dreidimensionalen Raum dargestellt.



*Abbildung 3-13: Voronoi-Regionen von Polyedern für die Features Punkt, Kante und Seitenfläche nach Mirtich 1998a am Beispiel eines Würfels*

### GJK-Algorithmus

Der GJK-Algorithmus wurde von GILBERT et al. 1988 publiziert und ist nach seinen Erfindern Gilbert, Johnson und Keerthi benannt. Er berechnet die Entfernung zwischen zwei konvexen Polyedern bzw. deren Durchdringungstiefe, d. h. wie weit sie sich überlappen.

Dazu wird die Minkowski-Differenz der beiden auf Kollision zu untersuchenden Polyeder berechnet. Diese ist für die Polyeder  $A$  und  $B$  definiert als:

$$A - B := \{a - b : a \in A, b \in B\}$$

Um den Abstand zwischen  $A$  und  $B$  zu bestimmen, wird der nächste Punkt der Minkowski-Differenz zum Ursprung berechnet. Hierfür gilt:

$$d(A, B) = \min \{ \|x\| : x \in A - B \}$$

Liegt der Ursprung in  $A-B$ , dann ist der Abstand gleich Null und  $A$  und  $B$  schneiden sich. Die Differenz  $A-B$  ist wiederum ein Polyeder, der deshalb auch Minkowski-Differenz-Polyeder genannt wird. Der GJK-Algorithmus bestimmt diesen jedoch nicht explizit, sondern basiert auf der iterativen Berechnung des nächstgelegenen Punktes auf einem *Simplex*. Ein Simplex ist die konvexe Hülle einer affin unabhängigen Punktemenge, es kann somit im dreidimensionalen Raum aus maximal vier Punkten bestehen und deshalb einen Punkt, eine Gerade, ein Dreieck oder ein Viereck bilden. Der GJK-Algorithmus wählt einen beliebigen Punkt aus  $A-B$  und bestimmt iterativ in jedem Zeitschritt ein neues Simplex, das näher am Ursprung liegt als das Simplex des vorhergehenden Zeitschritts. So konvergiert der Algorithmus für Polyeder in endlichen Zeitschritten gegen die korrekte Lösung.

CAMERON 1997 hat diesen Algorithmus um die Ausnutzung der zeitlichen Kohärenz erweitert und somit die Laufzeit verbessert. Eine ausführliche Beschreibung des GJK-Algorithmus findet sich in VAN DEN BERGEN 2004.

### Bewertung

Eine abschließende detaillierte Bewertung der beiden vorgestellten Algorithmen führt zu weit vom Thema weg. Generell lässt sich festhalten, dass der Aufwand für die Berechnung bei den vorgestellten Ansätzen durch verbessertes Hill-Climbing und Ausnutzung zeitlicher Kohärenz in asymptotischer Näherung  $O(1)$  (CAMERON 1996) beträgt.

Der closest feature Algorithmus benötigt eine geringere Zahl an Fließkomma-Operationen als der GJK-Algorithmus, ist jedoch nicht so robust und funktioniert nur bei disjunkten Polyedern (MIRTICH 1998a). Oft wird daher stattdessen V-Clip (MIRTICH 1998b) verwendet, bei welchem diese Einschränkung nicht vorliegt.

### Kollisionsbehandlung mithilfe der Starrkörpersimulation

In der Kollisionserkennung wurde festgestellt, ob eine Kollision von zwei Objekten vorliegt und im Falle einer Kollision wurden die entsprechenden Kollisions-

informationen berechnet. Unter der Kollisionsbehandlung ist die Reaktion auf eine Kollision zu verstehen, d. h. wie sich die Objekte danach weiterbewegen. Der Vorgang wird in der Literatur häufig auch als Kollisionsauflösung bezeichnet, wobei dieser Begriff für die Simulation von Produktionsanlagen nicht sehr treffend ist, da es durchaus Kollisionen gibt, die nicht aufgelöst werden müssen, sondern oft sogar beabsichtigt sind (z. B. Werkstück liegt auf einem Transportband).

Zur Kollisionsbehandlung bei der Simulation von Produktionsanlagen eignet sich vor allem die Starrkörpersimulation, da es sich in den meisten Fällen um nicht bzw. nur schwer deformierbare Objekte handelt. Zwar treten auch in Produktionsanlagen deformierbare Objekte auf, jedoch ist dies nicht sehr häufig der Fall. Darüber hinaus ist die Physiksimulation deformierbarer Objekte derzeit nicht echtzeitfähig und kann deshalb nicht weiter betrachtet werden. Ebenso werden Umwelteinflüsse (z. B. Wind) für die Simulation einer Produktionsanlage, die in der Regel in einer geschlossenen Halle steht, für vernachlässigbar angesehen.

Ehe die Starrkörpersimulation genauer betrachtet wird, folgt eine Definition des Begriffes *Starrkörper*.

#### **3.3.4.1 Definition eines Starrkörpers**

GOLDSTEIN et al. 2002 definieren einen Starrkörper als „ein System von Massenpunkten, die der holonomen Randbedingung unterworfen sind, dass die Abstände zwischen allen Punktpaaren während der Bewegung konstant bleiben“ (siehe Abbildung 3-14).

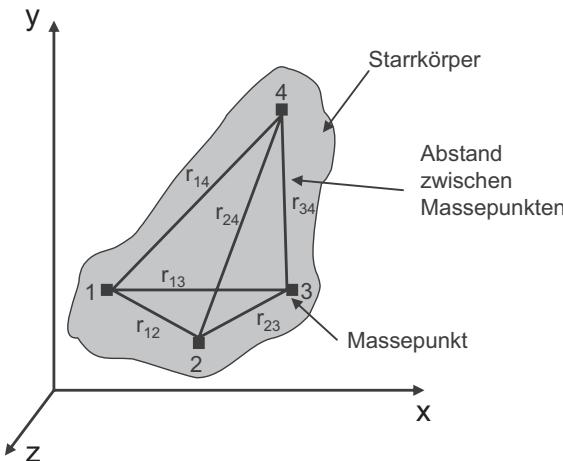


Abbildung 3-14: Definition eines Starrkörpers als System von Massepunkten mit konstantem Abstand  $r_{ij}$  aller Punktpaare nach Goldstein et al. 2002

Zur Beschreibung eines Starrkörpers im Raum reichen drei Positionskoordinaten eines Punktes und die Orientierung des Körpers aus. Ein freier Starrkörper, d. h. der nicht mit der Umgebung kollidiert und auch keine Verbindung zu einem anderen Starrkörper hat, hat sechs Freiheitsgrade, drei translatorische und drei rotatorische.

Zur Vereinfachung wird bei der Berechnung der Schwerpunkt des Starrkörpers als Referenzpunkt angenommen. Dadurch kann die Berechnung der translatorischen und der rotatorischen Bewegung komplett voneinander getrennt werden (MILLINGTON 2007, S. 152). Diese Vereinfachung beschleunigt die Berechnung deutlich.

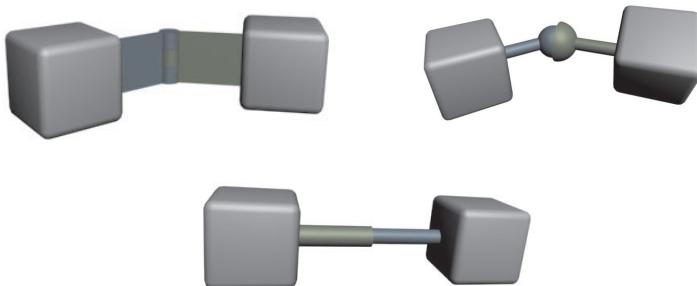
Neben der Position und der Orientierung besitzt ein Starrkörper noch die folgenden für die Simulation wichtigen Eigenschaften:

- Translatorische Geschwindigkeit des Referenzpunktes,
- rotatorische Geschwindigkeit, d. h. wie sich die Orientierung über der Zeit verändert,

- Masse des Starrkörpers, die als konstant über der Zeit angenommen wird, und
- Trägheitsmatrix, die die Verteilung der Masse im Starrkörper abbildet.

#### **3.3.4.2 Mehrkörpersimulation**

In Produktionsanlagen treten jedoch nicht nur einzelne Starrkörper auf, sondern häufig sind diese Starrkörper miteinander verbunden und die Bewegung eines Körpers wirkt sich dann auf die Position und Orientierung der angehängten Körper aus. Um diese Konstellationen (sogenannte Mehrkörper) nachzubilden zu können, werden in der Starrkörpersimulation sogenannte *Gelenke* (engl. Joints) verwendet. Es gibt viele verschiedene Gelenkartarten, so dass eine vollständige Übersicht an dieser Stelle den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Die wichtigsten Gelenkartarten zeigt Abbildung 3-15. Viele in der Praxis auftretende Verbindungen zwischen zwei Starrkörpern können mit diesen Gelenken simuliert werden.



*Abbildung 3-15: Wichtige Gelenkartarten für die Simulation von Starrkörpern; ein Scharniergelenk mit einem Freiheitsgrad, ein Kugelgelenk mit drei Freiheitsgraden und ein Schiebegelenk mit einem Freiheitsgrad*

Eine ausführliche Beschreibung von Gelenken für die dynamische Simulation von Mehrkörpern findet sich in BENDER 2007, der die Gelenke nach Translations- und Rotationsbedingungen einteilt.

### 3.3.4.3 Simulationszyklus

PARENT 2002 unterteilt den Simulationszyklus der Starrkörpersimulation in drei Berechnungsphasen (siehe Abbildung 3-16). Basis der Berechnungen sind die Eigenschaften des Starrkörpers (siehe Abschnitt 3.3.4.1). In der ersten Phase werden die wirkenden Kräfte (z. B. Gravitation) berechnet, die in der zweiten Phase zu Beschleunigungen auf Basis der Masse der Starrkörper umgerechnet werden. Danach werden in der dritten Phase die entsprechenden Veränderungen der Eigenschaften des Starrkörpers berechnet, die als Grundlage für den nächsten Simulationszyklus dienen.

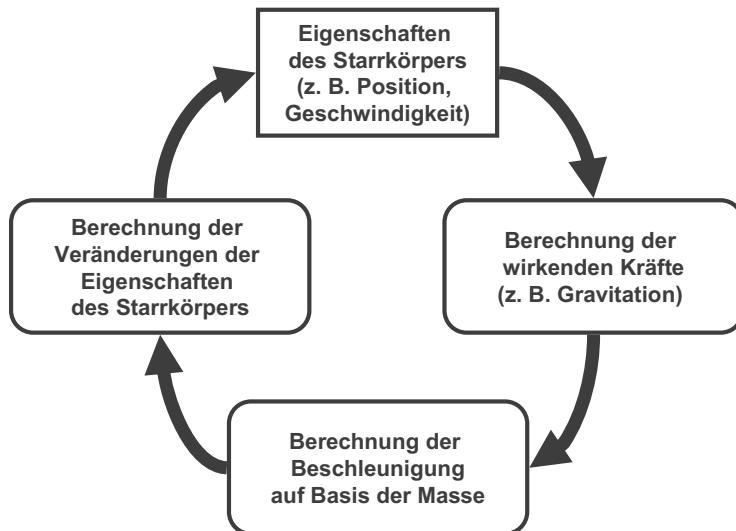


Abbildung 3-16: Beschreibung eines Simulationszyklus bei der Starrkörpersimulation nach Parent 2002

### 3.3.4.4 Starrkörpersimulation mit Zwangsbedingungen

Für die eigentliche Starrkörpersimulation existieren zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, auf denen alle derzeit verfügbaren Simulationsbibliotheken basieren. Zwar wurden diese Verfahren immer weiter verbessert und erweitert, aber der Kern blieb stets bestehen. Die beiden Ansätze werden im Folgenden als *Starrkörpersimulation mit Zwangsbedingungen* und *impulsbasierte Starrkörpersimulation* (siehe 3.3.4.5) bezeichnet.

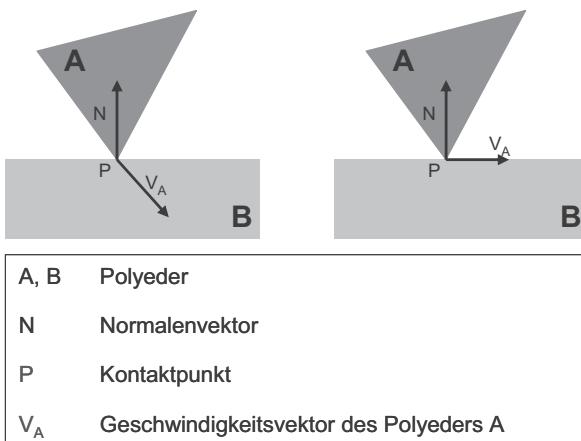
Die Starrkörpersimulation mit Zwangsbedingungen basiert auf einer Nicht-Durchdringungsbeschränkung für die einzelnen Körper, d. h. es wird unterbunden, dass sich die Körper durchdringen. Um dies zu erreichen, müssen Kräfte berechnet werden, die diese Zwangsbedingung erfüllen. Diese Berechnung kann auf verschiedene Arten erfolgen. Es wird zwischen dem *Penalty-Verfahren* und den *analytischen Verfahren* unterschieden:

#### **Penalty-Verfahren**

Im Falle einer erkannten Kollision und einer Durchdringung zweier Objekte werden in allen Kollisionspunkten fiktive Federn gespannt, um die Objekte wieder auseinanderzuziehen. Dieses sehr einfache Verfahren ist auf MOORE & WILHELM 1988 zurückzuführen. Zwar ist es für den allgemeinen Fall sehr schnell berechenbar und von niedriger Komplexität. Allerdings müssen sehr große Federkonstanten gewählt werden, um die Durchdringungen möglichst klein zu halten. Dies führt zu sehr steifen Differenzialgleichungen, die nur aufwendig gelöst werden können (BARAFF & WITKIN 1997, GILLESPIE & COLGATE 1997). Um das System stabil berechnen zu können, müssen sehr kleine Schrittweiten gewählt werden, was eine zusätzliche Erhöhung des Rechenaufwands bedeutet (PLATT & BARR 1988, MOORE & WILHELM 1988).

#### **Analytische Verfahren**

Bei der Anwendung von analytischen Verfahren zur Kollisionsauflösung wird zwischen *Kollisionen* und *anhaltenden Kontakten* unterschieden (BARAFF 1989). Anhaltende Kontakte sind Kollisionen zwischen zwei Objekten, die über einen längeren Zeitraum bestehen, d. h. nicht aufgelöst werden (z. B. Kiste auf einer ebenen Tischplatte). Kollisionen sind dagegen von unendlich kleiner Zeitspanne.



*Abbildung 3-17: 2-D-Ansicht einer Kontakt situation bei der Kollisionsauflösung durch analytische Verfahren; links eine Kollision und rechts ein anhaltender Kontakt zwischen den Objekten A und B (vgl. Eberly 2004, S. 241)*

Bei analytischen Verfahren wird bei anhaltenden Kontakten durch eine Kraft in Normalenrichtung das gegenseitige Eindringen der Objekte verhindert (siehe Abbildung 3-17). Bei der Bestimmung dieser Kräfte tritt meist das sogenannte Lineare Komplementaritätsproblem (LCP) auf, das von COTTLE et al. 1992 näher beschrieben wird.

Die Ideen und die Grundlagen für analytische Verfahren zur Kollisionsauflösung mit Zwangsbedingungen gehen auf die Arbeiten von BARZEL & BARR 1988, BARAFF 1989, BARAFF 1990, BARAFF 1991, BARAFF 1993, BARAFF 1994, STEWART & TRINKLE 1996, TRINKLE et al. 1997, STEWART & TRINKLE 2000 zurück und wurden im Laufe der Zeit immer weiter verbessert.

Die Reibung, die bei der Kollision von zwei Objekten auftritt, wird in den meisten Ansätzen mithilfe der Reibungsgesetze von Coulomb berechnet.

### 3.3.4.5 Impulsbasierte Starrkörpersimulation

Die *impulsbasierte Starrkörpersimulation* setzt zur Kollisionsauflösung keine Zwangsbedingungen voraus. Sollten Kollisionen auftreten, wird durch einen

Impuls in den zueinander am nächsten gelegenen Punkten der beiden Objekte ein Rückstoß bewirkt, der die Kollision auflöst und so eine Durchdringung verhindert. Treten zwischen zwei Objekten an mehreren Punkten gleichzeitig Kollisionen auf, werden diese nacheinander aufgelöst. Dabei können deshalb weitere Kollisionen auftreten, die nach und nach wieder aufgelöst werden müssen, bis alle Kollisionen behandelt wurden.

Der Vorteil des impulsbasierten Ansatzes liegt in der einfachen Berechnung der Impulse im Gegensatz zum Lösen komplexer Systeme von Differenzialgleichungen beim Ansatz mit Zwangsbedingungen.

Bereits MOORE & WILHELM 1988 präsentierten einen Ansatz zur analytischen Berechnung der Impulse zur Kollisionsauflösung. Die Durchdringung bei anhaltenden Kontakten wurde jedoch in dieser Arbeit durch eine Penalty-Methode verhindert. Die ersten Arbeiten mit einem impulsbasierten Ansatz auch für anhaltende Kontakte gehen auf Brian Mirtich und John Canny zurück (MIRTICH & CANNY 1994, MIRTICH & CANNY 1995, MIRTICH 1996). Für die Berechnung der Reibung kommen die Gesetze von Coulomb zur Anwendung. Die Vorteile der verschiedenen Ansätze und auch die Kombination eines Ansatzes mit Zwangsbedingung und eines impulsbasierten Ansatzes werden in MIRTICH 1995 diskutiert.

Bender und Schmitt erweiterten in den vergangenen Jahren die impulsbasierte Starrkörpersimulation auf Mehrkörpersysteme (BENDER et al. 2003, BENDER et al. 2005a, SCHMITT & BENDER 2005, BENDER 2007).

Sauer und Schömer entwickelten 1998 einen hybriden Ansatz für die Starrkörpersimulation, der je nach Kontakt situation den zwangsbasierten oder den impulsbasierten Ansatz aufruft. Mithilfe dieser Unterscheidung ist es möglich, immer den am besten geeigneten Algorithmus für die Berechnung der Physiksimulation zu verwenden. Der hybride Ansatz wurde im nicht öffentlich zugänglichen System GALILEO umgesetzt (SAUER & SCHÖMER 1998, SAUER et al. 1998).

#### **3.3.5 Bibliotheken für die Starrkörpersimulation**

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die bekanntesten Bibliotheken für die Starrkörpersimulation in alphabetischer Reihenfolge gegeben:

### **AGEIA™ PhysX™**

Die Simulationsbibliothek AGEIA™ PhysX™ wurde zur Steigerung der Realitätsnähe in Computerspielen durch Abbildung physikalischer Effekte entwickelt. Sie war die erste Simulationsbibliothek, zu deren Lieferumfang eine spezielle Einstekkkarte für die Physiksimulation gehörte. Mit dieser Karte wurde die Physiksimulation auf einen separaten Prozessor ausgelagert, was einen Geschwindigkeitsvorteil bringt. Die Kosten für die Einstekkkarte bewegen sich derzeit im niedrigen dreistelligen Eurobereich. Die nicht-kommerzielle Verwendung der Library ist kostenlos, die kommerzielle kostet ca. 32.500 €. Die Kollisionsrechnung der Simulationsbibliothek stützt sich bei der Berechnung nicht auf die polygonalen Modelle, sondern kann diese nur auf Basis von Grundgeometrien (z. B. Quader oder Kugel) durchführen. Dies hat zur Folge, dass die Modelle durch Grundgeometrien angenähert werden müssen, was eine Ungenauigkeit bei der Simulation nach sich zieht. AGEIA PhysX™ ist für die Betriebssysteme Microsoft® Windows und Linux erhältlich.

Link: [www.ageia.com](http://www.ageia.com)

### **Bullet Physics Library**

Die Bullet Physics Library ist eine Softwarebibliothek für die Kollisionserkennung und die Simulation von Starrkörpern. Die Kollisionserkennung basiert auf polygonalen Modellen und kann sowohl diskret, d. h. mit festen Zeitabständen, als auch kontinuierlich berechnet werden. Sie beruht auf dem GJK-Algorithmus. Die Starrkörpersimulation wendet einen impulsbasierten Ansatz an. Die Bibliothek ist für die Plattformen Microsoft® Windows, Macintosh und Unix sowie für die Playstation 3 erhältlich. Die Nutzung von Bullet Physics Library ist kostenlos, auch für gewerbliche Zwecke.

Link: [www.bulletphysics.com](http://www.bulletphysics.com)

### **Havok Physics™**

Eine sehr bekannte Bibliothek ist die Starrkörpersimulation Havok Physics™, die vor allem aufgrund der realistisch anmutenden Simulation der Effekte bei vielen Computerspielen und Animationsfilmen eingesetzt wird. Die Herstellerfirma gibt den verwendeten Ansatz für die Kollisionsrechnung und für die Simulation nicht bekannt. Die Kosten für die Nutzung von Havok Physics™ liegen nach Aussage von Havok Sales im sechsstelligen Dollarbereich. Ein Beispiel für die Integration von Havok Physics™ ist die Software Autodesk® 3ds Max®, die vor allem für die Erstellung von 3-D-Animationsfilmen genutzt wird.

Es gibt mittlerweile auch verschiedene Grafikkartenhersteller, die auf ihren Grafikkarten einen Prozessor für die Physiksimulation verbauen. Diese Hardwarelösungen basieren in vielen Fällen auf der Havok Physics™-Bibliothek (ATI Cross Fire Physics, nVidia SLI Physics).

Link: [www.havok.com](http://www.havok.com)

#### **Impulse-Based-Dynamic-Simulation**

Die Impulse-Based-Dynamic-Simulation (IBDS) wurde von Bender im Rahmen seiner Dissertation entwickelt (BENDER 2007). In der IBDS wird ein impulsbasierter Ansatz für die Simulation von Mehrkörpersystemen und von Partikeln verwendet, und zwar sowohl für Kollisionen als auch für anhaltende Kontakte. Die Kollisionsrechnung wird auf Basis von konvexen polygonalen Modellen durchgeführt. In der IBDS werden sehr viele verschiedene Gelenke (siehe 3.3.4.2) zur Verbindung von Objekten zu Mehrkörpersystemen zur Verfügung gestellt, die in anderen Bibliotheken nachträglich von Hand erstellt werden müssen. Die Bibliothek IBDS ist für die Plattformen Microsoft® Windows und Linux zum freien Download und zur freien Nutzung, auch für gewerbliche Zwecke, erhältlich.

Link: [www.impulse-based.de](http://www.impulse-based.de)

#### **Open Dynamics Engine™**

Die Open Dynamics Engine™ (ODE) ist eine sehr bekannte Open-Source-Softwarebibliothek für die Starrkörpersimulation, die ursprünglich von Smith entwickelt wurde (SMITH 2006). Smith verwendet in der ODE den Ansatz mit Zwangsbedingungen. Die ODE ist plattformunabhängig, also für Microsoft® Windows und Linux einsetzbar. Die Bibliothek zeichnet sich dadurch aus, dass die Kollisionsbestimmung mit polygonalen Modellen (Trimesh) gerechnet wird. Darüber hinaus ist es möglich, in ODE Bewegungen mittels Geschwindigkeitsvektoren abzubilden, womit ein schwieriges Bewegungsverhalten vereinfacht simuliert werden kann. Die Open Source Community um ODE ist sehr aktiv, weshalb die Bibliothek ständig weiterentwickelt wird. Sie ist unter zwei verschiedenen Lizenzen, der LGPL- und der BSD-Lizenz, erhältlich.

Link: [www.ode.org](http://www.ode.org)

#### **Simple Physics Engine**

Die Simple Physics Engine (SPE) ist eine noch relativ junge, aber sehr beeindruckende Starrkörpersimulationssoftware. Neben der Kollisionsberechnung auf

Basis von polygonalen Modellen werden von der SPE auch Features wie das Auseinanderbrechen von Objekten und die Simulation von Fluiden und Rauch unterstützt. In den ersten Versionen wurde für die Starrkörpersimulation ein impulsbasiertes Verfahren verwendet. Mittlerweile wurde dieser Ansatz in der Softwarebibliothek durch einen neuen Algorithmus ersetzt, der von den Entwicklern nicht bekannt gegeben wird. Die SPE ist für das Betriebssystem Microsoft® Windows konzipiert und unter einer eigenen Lizenz zu erwerben. Für alle Privatanwender ist die Verwendung der SPE kostenlos, für den gewerblichen Zweck gibt es verschiedene Lizenzmodelle für Preise zwischen 5.000 und 20.000 \$.

Link: [www.spehome.com](http://www.spehome.com)

### **Simulation Library for Virtual Reality and Interactive Applications**

Die Simulation Library for Virtual Reality and Interactive Applications (SiLVIA) wurde von einem Team von Entwicklern für die Simulation von Systemen aus Starrkörpern und deren Manipulation in virtuellen Welten umgesetzt. Der Fokus liegt auf der Montageplanung, auf Einbau- und Ergonomieuntersuchungen und auf Robotik. Für die Berechnung der Kollisionsauflösung werden von SiLVIA sowohl zwangsbasierte als auch impulsbasierte Ansätze unterstützt.

Die Bibliothek SiLVIA ist plattformunabhängig und wird zur kostenlosen Nutzung im Internet zum Herunterladen angeboten.

Link: [www-hotz.cs.uni-sb.de/home/silvia/](http://www-hotz.cs.uni-sb.de/home/silvia/)

### **3.3.6 Simulationsumgebungen mit Starrkörpersimulation**

Neben den einzelnen Simulationsbibliotheken gibt es mittlerweile viele Simulationsumgebungen, die entweder eine der oben beschriebenen Simulationsbibliotheken nutzen oder selbst entwickelte Algorithmen in die Umgebung integrieren. Im Folgenden werden einige wichtige Simulationsumgebungen vorgestellt, die über das Feature der Physiksimulation verfügen:

#### **COSIMIR®**

COSIMIR® ist nach Herstellerangaben ein universelles 3-D-Simulationssystem, das flexibel für unterschiedliche Anwendungsgebiete entwickelt wurde. Diese sind vielfältig und reichen vom Einsatz von 3-D-Simulationen in der Aus- und Fortbildung bis zur Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen. Durch die Arbeiten von Rossmann & Wischnewski 2007 und Wischnewski 2007 können in CO-

SIMIR® spurgeführte Transportprozesse mit physikalischen Effekten (z. B. Kollision bei Staubbildung und Gravitation) hinterlegt werden. Die Kollisionsberechnungen basieren auf der geometrischen Hülle der einzelnen Objekte. Die Massen der Objekte werden durch ein rechnerisches Verfahren angenähert, so dass kein zusätzlicher Modellierungsaufwand entsteht. Die Datenmodellierung sieht bei COSIMIR® ein zweistufiges Verfahren vor. Zunächst werden mit einer Low-Level-Modellierung die einzelnen Komponenten einer Produktionsanlage erstellt, danach werden in der High-Level-Modellierung die einzelnen Komponenten wie in einem Baukasten zu einer Anlage zusammengefügt. Die Geometrien können aus dem CAD unter anderem mit den gängigen Formaten VRML und STEP (Standard for the Exchange of Product model data) übernommen werden. COSIMIR® ist für das Betriebssystem Microsoft® Windows erhältlich.

Link: [www.virtual-environments.com](http://www.virtual-environments.com)

#### **Marilou Robotics Studio**

Das Marilou Robotics Studio ist eine Programmier- und Simulationsumgebung für mobile Roboter. Die 3-D-Simulationsumgebung verfügt über eine Kollisionsrechnung, die auf polygonalen Modellen basiert, und über eine Kollisionsauflösung. Diese greift auf die Funktionen aus der ODE-Library zurück. Darüber hinaus werden zahlreichen Sensoren (z. B. Laserscanner oder Kamera) unterstützt. Zusätzlich erlaubt das Marilou Robotics Studio eine Interaktion des Benutzers während der Simulation. Es ist mit verschiedenen Lizenzen für Microsoft® Windows erhältlich, die Privatanwendung ist kostenlos.

Link: [www.anykode.com/index.php](http://www.anykode.com/index.php)

#### **Microsoft® Robotics Studio**

Das Microsoft® Robotics Studio ist eine grafische Entwicklungsumgebung zum Programmieren und Simulieren von Robotern, z. B. Lego® Mindstorm. Die Simulationsumgebung nutzt zur Kollisionsrechnung und Physiksimulation die Bibliothek AGEIA™ PhysXTM. Es werden verschiedene Sensoren, u. a. auch Kameras, unterstützt. Durch die serviceorientierte Architektur kann der Benutzer eigene Module für die Simulation in Form von Software- und Hardwareservices entwickeln. Die für nicht kommerzielle Zwecke kostenlose Software basiert auf .NET 2.0 und läuft unter Microsoft® Windows XP und höher. Der Preis für den gewerblichen Einsatz beträgt pro Lizenz 399 \$.

Link: [msdn2.microsoft.com/de-de/robotics/default\(en-us\).aspx](http://msdn2.microsoft.com/de-de/robotics/default(en-us).aspx)

### Player/Gazebo

Die Simulationsumgebung Player/Gazebo ist eine sehr bekannte Plattform für die Programmierung von autonomen Robotern. Sie ist für das Betriebssystem Linux frei im Internet erhältlich und kann auch in einem Cluster betrieben werden. Das modulare Konzept von Player/Gazebo erlaubt die Einbindung einer Physics Engine, standardmäßig ist ODE in der Version 0.5 integriert. Player/Gazebo unterscheidet zwischen dem zu visualisierenden Modell und dem Modell, das für die Berechnungen der Physics Engine geladen wird. Während beim zu visualisierenden Modell polygonisierte Objekte geladen werden können, müssen die Modelle für die Physics Engine aus Grundkörpern (z. B. Box oder Kugel) aufgebaut werden. Diese Modelle können mittels eines Plug-in-Konzepts in die Simulationsumgebung eingebunden werden, d. h. für jedes zu ladende Modell müssen die entsprechenden Eigenschaften direkt im Quellcode hinterlegt werden. Player/Gazebo bietet eine Reihe von Sensoren (z. B. Laserscanner) an, die in die Simulationsumgebung integriert werden können. Aufgrund der offenen Schnittstellen und der entsprechenden Konzepte kann Player/Gazebo vom Anwender erweitert werden (z. B. Laden von polygonisierten Modellen in die Physiksimulation).

Link: [playerstage.sourceforge.net/gazebo/gazebo.html](http://playerstage.sourceforge.net/gazebo/gazebo.html)

#### 3.3.7 Zusammenfassung

Die Physiksimulation, insbesondere die Starrkörpersimulation, setzt sich aus den beiden Phasen *Kollisionserkennung* und *Kollisionsbehandlung* zusammen. Um eine Kollision zwischen zwei Objekten in einer virtuellen Szene erkennen zu können, müssen die Geometrie, die Lage und die Orientierung der einzelnen Objekte in jedem Simulationsschritt bekannt sein bzw. berechnet werden können. Um die Berechnung, ob in einem Simulationsschritt eine Kollision vorliegt, zu beschleunigen, wird meist eine Komplexitätsreduzierung durchgeführt. Hierzu kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, die häufig auch in Kombination verwendet werden. Wenn eine Kollision eingetreten ist, werden danach die Kollisionsinformationen (Kollisionspunkt, Kollisionsnormale, Durchdringungstiefe) berechnet. Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Kollisionsbehandlung durchgeführt. Hierfür werden bei der Starrkörpersimulation Ansätze mit Zwangsbedingungen oder auch impulsbasierte Verfahren verwendet.

Für die Berechnung der Starrkörpersimulation gibt es verschiedene Bibliotheken, die Schnittstellen für die Kollisionserkennung und -behandlung zur Verfügung stellen. Diese Bibliotheken werden in einigen wenigen verfügbaren Simulationsumgebungen eingesetzt. Die meisten dieser Simulationsumgebungen stammen aus dem Bereich der autonomen Roboter und sind deshalb für die Simulation im Rahmen eines integrierten Entwicklungsprozesses ungeeignet, da wichtige Anforderungen, wie z. B. die Echtzeitfähigkeit, nicht erfüllt werden können.

## **3.4 Virtual-Reality-Technologie**

### **3.4.1 Allgemeines**

Die VR-Technologien haben sich in den vergangenen Jahren sehr stark weiterentwickelt. Vor allem im Bereich der Interaktion stehen nun neuartige Ein- und Ausgabegeräte zur Verfügung, mit welchen die Möglichkeiten während der Simulation durch die Interaktion des Benutzers deutlich erweitert wurden. Durch die Kombination von VR mit anderen Simulationswerkzeugen wird die Idee des skalierbaren Engineerings ermöglicht (AURICH et al. 2007). Dieses sieht den Einsatz von VR-Technologien für die Interaktion und Immersion des Benutzers vor. Die in der VR dargestellten Szenen bzw. die zugrunde liegenden Datenmodelle werden durch die Ergebnisse aus Engineeringwerkzeugen (z. B. Simulationen) angereichert (siehe Abbildung 3-18).

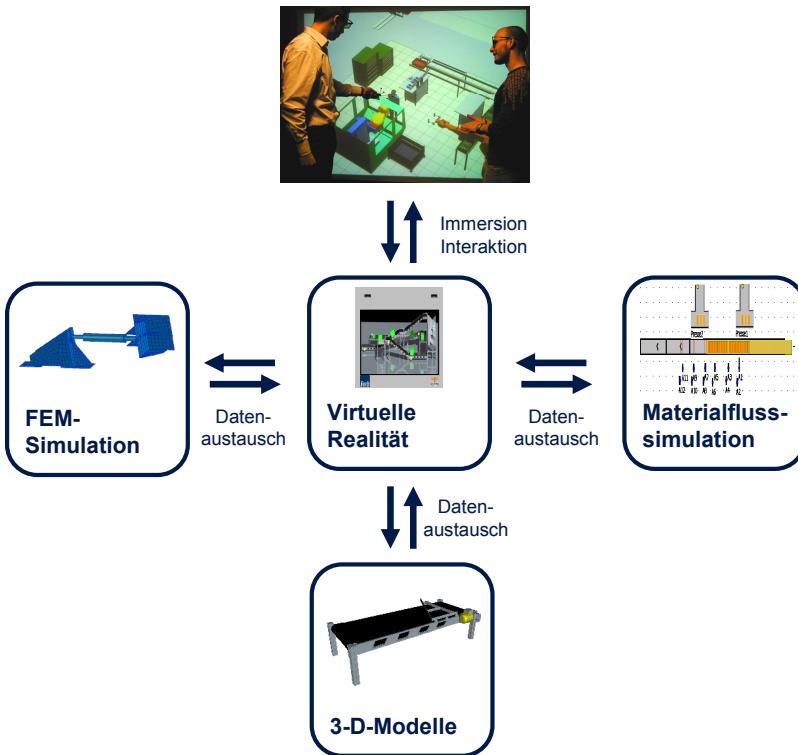


Abbildung 3-18: Skalierbares Engineering – Kombination von VR-Technologien durch die Anreicherung mit Ergebnissen aus anderen Simulationswerkzeugen (vgl. Aurich et al. 2007)

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Technologien für die Ein- und Ausgabe zusammengefasst vorgestellt, die zur Verbesserung der Interaktion bei der Simulation und zugleich zur Steigerung der Immersion des Benutzers beitragen. Als *Immersion* wird das „Eintauchen“ des Benutzers in die VR bezeichnet, d. h. Immersion ist der Grad für die Integration des Benutzers in die VR. Je größer die Immersion ist, desto schneller verschwindet der Übergang zwischen der Realität und der VR. Dies lässt sich vor allem durch eine multimediale Darstellung, d. h. durch eine visuelle, auditive und haptische Ausgabe erreichen. Neben der Ausgabe steigern auch intuitive Eingabemöglichkeiten den Grad

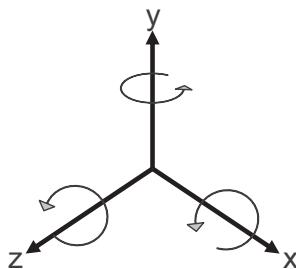
der Immersion in VR-Anwendungen. Im Folgenden werden deshalb die Möglichkeiten der Ein- und Ausgabe in der VR näher beschrieben.

#### **3.4.2 Eingabe**

Bei der Eingabe in der VR muss zwischen den Eingabegeräten und der 3-D-Interaktionstechnik unterschieden werden. Ein *Eingabegerät* ist ein physikalisches Werkzeug für den Benutzer, eine *3-D-Interaktionstechnik* ist hingegen die Verarbeitung der aus dem Eingabegerät stammenden Daten in der VR-Anwendung. Eine ergonomische Bedienbarkeit erfordert eine möglichst natürliche und intuitive Abbildung zwischen dem Eingabegerätes in die 3-D-Interaktionstechnik (BOWMAN et al. 2005).

##### **Eingabegeräte**

Charakteristisch für die VR ist die Eingabe im dreidimensionalen Raum, bei der drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade (DoF) abgedeckt werden, um z. B. einen virtuellen Cursor in der Simulation vollständig frei bewegen zu können (siehe Abbildung 3-19).



*Abbildung 3-19: Translatorische und rotatorische Freiheitsgrade eines Objektes im virtuellen Raum (vgl. Burdea & Coiffet 2003 S. 17)*

Aus diesem Grund haben typische VR-Eingabegeräte mindestens sechs Freiheitsgrade, jedoch können auch 2-D-Eingabegeräte (z. B. Computermaus) eingesetzt werden. Meist werden in diesen Fällen die fehlenden Freiheitsgrade durch eine Kombination von Aktionen (z. B. Bewegen der Maus bei gleichzeitigem Drücken der Tasten für die Bewegung in z-Richtung) abgebildet. Dies entspricht aber keiner intuitiven Eingabe, so dass an dieser Stelle nicht näher auf diese Art

von Eingabegeräten eingegangen wird. Im Folgenden werden typische VR-Eingabegeräte beschrieben, die für einen Einsatz in einer Simulationsumgebung im Produktivbetrieb, d. h. nicht nur zu Forschungszwecken, verwendet werden könnten.

Eingabegeräte können nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden. Häufig wird zwischen der tischgebundenen und der räumlichen Eingabe (Spatial Input) unterschieden.

#### Tischgebundene Eingabegeräte

- SpaceMouse

Die SpaceMouse ist ein 6-DoF-Eingabegerät, das schon in den 1970er Jahren für die Steuerung in der Robotik entwickelt wurde. Ungefähr zehn Jahre später wurde entdeckt, dass sich die SpaceMouse auch für 3-D-Grafik- und CAD-Anwendungen als Eingabegerät hervorragend eignet. In diesem Bereich wurden die Entwicklungen maßgeblich vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) vorangetrieben und patentiert. Die Bedienung der SpaceMouse erfolgt durch Ziehen, Drücken, Kippen und Drehen eines puckförmigen Körpers mit der linken oder rechten Hand. Nach dem Loslassen geht die SpaceMouse zurück in die Ausgangsstellung. Die Messung der Eingabebewegung erfolgt durch optoelektronische Sensoren. Zusätzlich besitzt eine SpaceMouse Eingabetasten, die für jede Anwendung individuell belegt werden können. Weiterentwickelt und vertrieben wird das Eingabegerät vom Logitech-Unternehmen 3Dconnexion (3DCONNEXION 2008).

- PHANToM®

Das Eingabegerät PHANToM® (Personal Haptic Interface Mechanism) der Firma SensAble Technologies Inc. zeichnet sich durch die einfache Bedienbarkeit für den Benutzer in sechs Freiheitsgraden aus. Dies wird durch einen kleinen beweglichen Kraft-Feedback-Arm erreicht, der an der Spitze entweder mit einem Fingerhut oder einem Stift geführt werden kann (BURDEA & COIFFET 2003, S. 104). Über diesen Arm können in der Simulation auftretende Kräfte an den Benutzer weitergegeben werden. Das PHANToM® zählt deshalb zu den haptischen Eingabegeräten. Obwohl die Kosten für dieses Eingabegerät die der SpaceMouse um ein Mehrfaches übersteigen, ist das PHANToM® aufgrund der einfachen Handhabung bei der Bedienung in der Forschung weitverbreitet und hat auch schon in industriellen Anwendungen Einzug gehalten (ZÄH et al. 2007).

#### Räumliche Eingabegeräte

HINCKLEY et al. 1994 beschreiben Interaktionsmethoden, bei denen die Position und die Orientierung eines Eingabegerätes im realen dreidimensionalen Raum als Eingabe für den virtuellen Raum von Bedeutung sind (Spatial Input). Zur Erfassung der räumlichen Position und Orientierung eines Eingabegerätes im Raum bedarf es eines Trackingverfahrens, das sogenannte Motion Tracking (dt. Bewegungsmessung), das auf dem Triangulationsprinzip basiert. Die Umsetzung kann mit folgenden Technologien geschehen:

- Elektromagnetisches Tracking

Beim elektromagnetischen Tracking wird durch einen Emitter über drei orthogonal angeordnete Spulen ein niederfrequentes Magnetfeld erzeugt. Der Empfänger, der am beweglichen Objekt angebracht ist, ist über ein Kabel mit dem Controller verbunden. Nachteile des magnetischen Trackings sind die eingeschränkte Bewegungsfreiheit und die möglichen Störeinflüsse durch metallische Gegenstände im näheren Umfeld. Die Vorteile des elektromagnetischen Trackings liegen in den geringen Anschaffungskosten und der Möglichkeit des Multitrackings, d. h. dass mehrere Objekte gleichzeitig erfasst und identifiziert werden können.

- Mechanisches Tracking

Beim mechanischen Tracking besteht eine Verbindung zwischen dem Referenzpunkt und dem zu messenden Objekt. Dies kann z. B. in Form eines Gestänges realisiert werden, das in den Gelenken zusätzlich mit Messsensoren ausgestattet ist, um durch die vorgegebenen Längen und die einzelnen Winkelstellungen den genauen Abstand in den drei Raumrichtungen berechnen zu können. Zusätzlich kann so auch bei vielen Geräten die Rotation bestimmt werden, wodurch sechs Freiheitsgrade abgedeckt werden können (Beispiel PHANToM® oder Haptic-MASTER). Dieses Verfahren ist sehr präzise, schränkt jedoch den Arbeitsraum für den Benutzer ein, und erlaubt deshalb keine freie Bewegung im Raum.

- Akustisches Tracking

Beim akustischen Tracking werden mithilfe von jeweils drei speziellen Lautsprechern und Mikrofonen Ultraschallwellen ausgegeben und aufgenommen. Die Lautsprecher werden sequenziell aktiviert. So wird die Distanz zu den Mikrofonen erfasst. Anschließend kann über das Triangulationsverfahren die Position und die Rotation berechnet werden. Dieses Verfahren bietet nur eine geringe

Genauigkeit und ist von vielen Umgebungsparametern (z. B. Temperatur und Luftdruck) abhängig, so dass es als störanfällig bezeichnet werden muss.

- Inertial Tracking

Beim Inertial Tracking kommen in der Regel sowohl ein Beschleunigungssensor als auch ein Kreiselkompass zum Einsatz. Mithilfe dieser Messinstrumente können Position und Orientierung eines Objektes bestimmt werden. Die Sensoren sind im beweglichen Objekt verbaut und die Daten werden entweder über ein Kabel oder auch kabellos (z. B. Bluetooth) an den Tracking-Controller übertragen. Der größte Nachteil des Inertial Trackings sind akkumulierende Positions- und Orientierungsfehler (FOXLIN 2002).

- Optisches Tracking

Das optische Tracking kann für mehrere Objekte gleichzeitig angewandt werden, wodurch ein sogenanntes Multitracking möglich ist. Hierzu werden die zu messenden Objekte jeweils mit einem eindeutigen Marker (Kennzeichen) ausgestattet. Mithilfe dieses Markers, der z. B. beim Tracking mit Infrarot-Kameras eine kleine Anordnung von retroreflektierenden Kugeln sein kann, können die Objekte bei der Auswertung der Kamerabilder gefunden und so die Position und Orientierung bestimmt werden. Dieses kabellose Verfahren bietet große Vorteile in der Genauigkeit (<1 mm), in der Bewegungsfreiheit des Benutzers und im großen Arbeitsraum, jedoch ist darauf zu achten, dass die Marker von den Kameras nicht verdeckt werden. Darüber hinaus sind die Kosten für ein optisches Tracking mit Infrarot relativ hoch.

Häufig werden verschiedene Trackingtechnologien kombiniert, um die Genauigkeit zu erhöhen und die Schwächen der einzelnen Verfahren ausgleichen zu können. Um die Eingabemöglichkeiten für den Benutzer zu steigern, werden Eingabegeräte zusätzlich mit einem Trackingverfahren versehen, damit die Position und Orientierung des Eingabegerätes im Raum und die Interaktion des Benutzers (z. B. Drücken eines Buttons) erfasst werden können. Einfache Beispiele hierfür sind der Polhemus Stylus, ein stiftähnliches Instrument mit einer Eingabetaste, das mit einem Kabel an einen Trackingcontroller angeschlossen ist, oder auch der FlyStick, eine Art Joystick mit mehreren Eingabetasten, der mittels optischer Marker von einem optischen Trackingsystem erfasst wird.

Ein etwas komplexeres Eingabegerät ist die Kombination eines Datenhandschuhs (siehe Abbildung 3-20) mit einem Trackingsystem, denn in diesem Fall können

bis zu 22 Freiheitsgrade der Hand und die Position und Orientierung der Hand im Raum erfasst und berechnet werden (BURDEA & COIFFET 2003, S. 108). Darüber hinaus können auf die einzelnen Finger des Benutzers Kräfte mittels eines sogenannten Exoskeletts zurückgegeben werden. Dieses Eingabegerät ist sowohl für die linke als auch für die rechte Hand erhältlich und ist somit für eine beidhändige Interaktion geeignet. Aufgrund der Komplexität und der Kosten sind Datenhandschuhe derzeit fast ausschließlich in der Forschung verbreitet. Gute Beispiele für die Möglichkeiten, die dieses Eingabegerät bietet, zeigen EGERMEIER 2008 am Beispiel der Simulation manueller Montagevorgänge und GÜNTHER et al. 2008 am Beispiel der Simulation von Kommissionievorgängen.



*Abbildung 3-20: Datenhandschuh CyberGlove® mit Exoskelett CyberGrasp™ für die Erfassung von 22 Freiheitsgraden der Hand mit Kraftrückgabe auf die Finger des Benutzers (Quelle: Immersion Corporation)*

Ein weiterer Ansatz zum Tracking der Hand bzw. der Finger ist das Fingertracking der Firma Advanced Realtime Tracking GmbH. Dieses Eingabegerät kann bis zu fünf Finger pro Hand mit einem optischen Trackingsystem und aktiven Leuchtdioden erkennen. Der Vorteil dieses Systems liegt in der relativ einfachen Handhabung und der Möglichkeit, Fingergesten des Benutzers erfassen zu können. Allerdings unterstützt es keine Kraftrückkopplung und kann auch nicht alle Freiheitsgrade der Hand abdecken.

Es gibt noch zahlreiche weitere Eingabegeräte, die in Forschungsarbeiten entstanden sind und viele neue Möglichkeiten bieten, jedoch für den Einsatz in der Produktionstechnik wegen mangelnder Robustheit derzeit noch nicht geeignet sind. Einen guten Überblick zu Eingabegeräten für die Interaktion in der VR geben BOWMAN et al. 2005.

### 3-D-Interaktionstechnik

BOWMAN et al. 2005 definieren *Interaktionstechnik* als die Methode zum Ausführen einer Aufgabe mittels einer Benutzerschnittstelle. Dies umfasst sowohl die Hardware für die Ein- und Ausgabe als auch die Software. Die Software übersetzt die Informationen vom Eingabegerät in Aktionen in der VR-Umgebung und gibt zugleich Informationen aus der VR-Umgebung über die Ausgabegeräte an den Benutzer aus.

Nach BOWMAN et al. 2001 existieren vier Grundformen der Interaktion in der VR:

- Navigation

Als *Navigation* durch eine virtuelle Welt wird das Fortbewegen bezeichnet, d. h. die Kameraperspektive des Benutzers wird durch die Szene bewegt. Um die Navigation in einer VR-Applikation umzusetzen, stehen verschiedene Techniken zur Verfügung, die BOWMAN et al. 2005 sehr detailliert beschreiben.

- Selektion

*Selektion* ist die Auswahl eines virtuellen Objektes in der Szene. Hierfür bestehen zwei verschiedene Ansätze: Selection by Naming und Selection by Pointing. Bei der Selection by Naming kann der Benutzer das Objekt durch Eingabe des Objektnamens auswählen. Dies kann entweder durch eine 3-D-Eingabe oder durch eine Eingabe in einer externen Bedienoberfläche realisiert werden. Für die Selection by Pointing gibt es grundsätzlich drei Mechanismen, mit welchen erkannt werden kann, welches Objekt der Benutzer auswählen möchte: Picking, Pointing und Gaze-Directed Selection. Picking ist die direkte Auswahl eines Objektes mithilfe eines Eingabegerätes (z. B. Datenhandschuh). Pointing bezeichnet das Zeigen eines Objektes, das auch außerhalb der Reichweite des Benutzers liegen darf, durch einen virtuellen Zeigestab (z. B. Laserpointer). Gaze-Directed Selection ermöglicht dem Benutzer die Selektion eines Objektes durch die Auswertung der Blickrichtung des Benutzers. Die Blickrichtung kann z. B. mit einem Trackingsystem berechnet werden.

- Manipulation

Die *Manipulation* ermöglicht dem Benutzer das Verändern der Objekteigenschaften. Um eine Manipulation durchführen zu können, muss vorher das entsprechende Objekt selektiert werden. Deshalb sind Selektion und Manipulation eng miteinander verbunden und gehen in manchen Applikationen ineinander über.

- Applikationssteuerung

Neben der Interaktion in der virtuellen Szene ist es auch erforderlich, für den Benutzer eine Möglichkeit für die Steuerung der eigentlichen Applikation anzubieten. Der Benutzer kann so Befehle (z. B. das Umschalten zwischen verschiedenen Modi) oder Systemparameter modifizieren. Die Umsetzung kann entweder in die 3-D-Umgebung integriert sein oder auch mit einer externen 2-D-Bedienoberfläche erfolgen.

#### **3.4.3 Ausgabe**

Die Ausgabe in einem VR-System kann auf viele verschiedene Arten umgesetzt werden. Grundsätzlich hängt die Ausgabe von den Sinnen ab, die dem Menschen zur Aufnahme von Reizen zur Verfügung stehen. Die Wahrnehmung des Menschen wird klassisch entsprechend der Sinne wie folgt eingeteilt:

- Visuelle Wahrnehmung (Sehen)
- Taktile Wahrnehmung (Tasten)
- Auditive Wahrnehmung (Hören)
- Olfaktorische Wahrnehmung (Riechen)
- Gustatorische Wahrnehmung (Schmecken)

Ungefähr 70 % der Wahrnehmung des Menschen lassen sich auf das Sehen zurückführen. Der Mensch hat ein Blickfeld von - 100 bis + 100 Grad in der Horizontalen und - 60 bis + 60 Grad in der Vertikalen. Daher ist die visuelle Ausgabe in VR-Umgebungen von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich hat das menschliche Auge ein zeitliches Auflösungsvermögen von ca. 20 – 30 ms. CHARWAT 1994 empfiehlt deshalb eine Darstellungs frequenz von mindestens 60 Hz, um die Ausgabe dem Benutzer ansprechend und flimmerfrei vermitteln zu können.

SPATH 2005 fordert für die Simulation eine immersive Umgebung, um die Vorstellungskraft des Benutzers zu erhöhen und damit das Verständnis einer Produktionsanlage zu erleichtern. Um dem Menschen einen guten Immersionseindruck bieten zu können, ist eine stereoskopische Ausgabe erforderlich. Hierbei werden für das linke und das rechte Auge separate Bilder erzeugt und angezeigt, so dass ein räumlicher Eindruck entstehen kann. Zusätzlich ist es wichtig, dass die Position des Benutzers bekannt ist, um die richtige Perspektive berechnen zu können. Hierfür kommen bei vielen Ausgabegeräten Trackingsysteme zum Einsatz, die die Kopfposition des Benutzers verfolgen. Die visuellen Ausgabesysteme, die für diesen Einsatz bei einer Simulation in der VR geeignet sind, reichen vom einfachen Monitor mit Stereo-Emitter über ein Head-Mounted-Display (HMD) bis hin zu einer Sechs-Seiten-Projektion, einer Cave Automatic Virtual Environment (CAVE). So ist die Ausgabe eine skalierbare Größe und kann an den speziellen Anwendungsfall angepasst werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ausgabegeräte für eine stereoskopische Anzeige in der VR beschrieben, die auch für die Simulation in der Produktionstechnik eingesetzt werden können:

- Monitor mit Stereo-Emitter

Eine stereoskopische Ausgabe an einem handelsüblichen Monitor kann mit einem Stereo-Emitter erfolgen, der in der Regel auf dem Monitor angebracht wird und optischen Kontakt zum Benutzer haben muss. Der Benutzer wird mit einer sogenannten Shutter-Brille ausgestattet, die auf ein spezielles Signal des Stereo-Emitters hin abwechselnd das linke oder rechte Brillenglas verdunkelt, wodurch der Benutzer für einen kurzen Augenblick nur mit einem Auge das Bild am Monitor sehen kann. Der Stereo-Emitter ist über ein Kabel mit der Grafikkarte verbunden, damit die Signalgabe zum richtigen Zeitpunkt erfolgt und dem Benutzer so ein 3-D-Eindruck vermittelt wird.

- Autostereoskopisches Display

Diese Art von Monitoren kommt ohne Brillentechnologie aus. Der Vorteil ist damit, dass der Benutzer nicht durch das Tragen einer speziellen Brille in seiner Arbeit eingeschränkt wird. Dabei wird das anzuzeigende Bild mithilfe eines vertikalen Interlace-Verfahrens und eines Strahlteilers in zwei Bilder, eines für das linke und eines für das rechte Auge, separiert. Meist wird die Augenposition des Benutzers durch ein Augentracking dynamisch berechnet, so dass die Blickposition bekannt ist und das Bild entsprechend angepasst werden kann.

- Head-Mounted-Display (HMD)

Das HMD ist nach Definition direkt mit dem Kopf des Benutzers verbunden (BOWMAN et al. 2005) und bewegt sich somit mit seinem Träger mit. Dem Benutzer wird das Bild durch Anzeige auf zwei kleinen Monitoren, die in eine Art Helm integriert sind, vermittelt. Das HMD wird deshalb auch oft als Datenhelm bezeichnet. Eine gute Übersicht über die verschiedenen Arten und Bauformen von HMDs gibt PATRON 2005 auf Seite 26. Die technischen Grundlagen beschreibt STUART 1996 detailliert.

- Hemisphärisches Display

Bei einem *hemisphärischen Display* wird das Bild mit einem Beamer in eine Halbkugel projiziert. Der Beamer ist mit einer speziellen weitwinkeligen Linse ausgestattet, die auch als Fischaugenlinse bezeichnet wird. Der Benutzer sitzt direkt vor der Halbkugel, wodurch sein Blickfeld davon komplett abgedeckt wird. Dieses Verfahren ist keine stereoskopische Projektion, weil nur ein Bild für beide Augen projiziert wird. Durch das Zusammenspiel der speziellen Linse und der halbkugelförmigen Projektionsfläche kann dem Benutzer trotzdem ein räumlicher Eindruck der simulierten Umgebung vermittelt werden.

- Workbench

Mit dem Begriff *Workbench* werden Displays bezeichnet, die in einer geneigten Tischform oder auch wie eine Art Werkbank dem Benutzer stereoskopisch die virtuelle Szene visualisieren können. Workbenches arbeiten mit Rückprojektion bzw. mit einer Projektion von unten, um dem Benutzer einen uneingeschränkten Arbeitsraum bieten zu können. Die Projektion wird mit Beamern durchgeführt.

- Powerwall

Ebenfalls mit Rückprojektion wird dem Benutzer an einer *Powerwall* ein immersiver Eindruck vermittelt. Eine Powerwall hat meist eine Größe von ca. 200 cm x 150 cm (Breite x Höhe), so dass sie sich auch für die Präsentation vor einem kleinen Publikum (bis zu ca. 10 Personen) eignen. In vielen größeren Unternehmen sind deshalb schon seit einigen Jahren sogenannte Showrooms verbreitet, in welchen Projektionswände, wie z. B. eine Powerwall, auch große Szenarien für mehrere Benutzer immersiv darstellen können.

- Mehrseitenprojektion

Bei einer *Mehrseitenprojektion* wird das Prinzip einer Powerwall auf bis zu sechs Seiten eines Raumes, die sogenannte CAVE, erweitert. Hierzu wird das anzugebende virtuelle Modell in einzelne Ansichten für jede Seite der Mehrseitenprojektion durch Berechnung aufgeteilt und dann auf die einzelnen Seiten projiziert. Für jede Seite wird dann das stereoskopische Verfahren angewandt. Mehrseitenprojektionen können einen sehr guten Immersionseindruck bieten, wodurch für den Benutzer der Übergang zwischen Realität und VR nur schwer wahrnehmbar ist. Allerdings existieren relativ wenige VR-Anlagen mit einer Mehrseitenprojektion in Deutschland, weil allein schon die Administration derartiger Systeme sehr arbeitsaufwendig und teuer ist.

Die taktile Wahrnehmung des Menschen wird in VR-Systemen durch den Einsatz haptischer Interaktionsgeräte unterstützt. Diese können bei Kollisionen kleine Kräfte auf die Hand oder die Finger des Benutzers ausgeben und so einen Widerstand fühlen lassen. Die taktile Wahrnehmung ist selbstverständlich komplexer und haptische Interaktionsgeräte sind nur als erster Schritt für die Unterstützung der taktilen Wahrnehmung zu verstehen. Der Grund hierfür ist, dass durch die Ausgabe von kleinen Kräften auf die Hand oder die Finger der komplexe Tastsinn des Menschen nicht ausreichend angesprochen werden kann. Eine ausführliche Beschreibung der haptischen Ausgabe gibt BURDEA 2003.

Die auditive Wahrnehmung steigert den Immersionseindruck eines Menschen in einer VR-Umgebung. Es bestehen einige interessante Ansätze für eine Umsetzung, die von BOWMAN et al. 2005 ausführlich beschrieben werden. Das künstliche Erzeugen von Geräuschen, die in der Produktionstechnik auftreten können, ist ein sehr komplexes Thema, weshalb bislang für deren Simulation in der Produktionstechnik keine Umsetzung bekannt ist.

Die olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung des Menschen wird derzeit in keinen kommerziell verfügbaren VR-Systemen unterstützt und ist auch für die Simulation in der Produktionstechnik als unwichtig anzusehen. Daher wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

#### **3.4.4 Zusammenfassung**

Die VR-Technologien haben sich in den vergangenen Jahren sehr stark weiterentwickelt. Vor allem für die Interaktion des Benutzers stehen nun neuartige Ein-

und Ausgabegeräte zur Verfügung, mit welchen die Möglichkeiten während der Simulation durch die Interaktion des Benutzers deutlich erweitert werden. Durch die Kombination von VR mit der Simulation können Simulationsumgebungen in der Bedienung vereinfacht und den real gegenüberstehenden Prozessen (z. B. das Einfahren eines Förderbandes) nachempfunden werden. Durch eine immersive Ausgabe kann darüber hinaus das Vorstellungsvermögen des Benutzers unterstützt werden, so dass der Übergang von der virtuellen Produktionsanlage auf die reale Produktionsumgebung nach Abschluss der Simulation ohne Probleme bewältigt werden kann.

### **3.5 Zusammenfassung der Grundlagen und des Stands der Technik**

In Kapitel 3 wurden die Grundlagen und der Stand der Technik zu den Themen virtuelle Inbetriebnahme, Physiksimulation und VR erörtert, die zur Konzipierung und Entwicklung einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen notwendig sind. Die beschriebenen Verfahren bilden die Basis für eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen zur Simulation von Produktionsanlagen und deren Steuerungstechnik. Durch die Integration einer Physiksimation in eine Testumgebung für die virtuelle Inbetriebnahme ist es möglich, das aufwändig zu erstellende Materialflussmodell durch ein Physikmodell der Produktionsanlage zu ersetzen. Die beschriebenen Techniken der VR verbessern die Interaktion des Benutzers bei der Simulation, weshalb die Simulationsabläufe schneller und intuitiver durchgeführt werden können. Zunächst müssen aber die genauen Anforderungen an eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen analysiert und bewertet werden. Eine detaillierte Beschreibung der Anforderungen folgt im nächsten Kapitel.

## 4 Anforderungsanalyse

### 4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Anforderungen, die an eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen zu stellen sind, näher analysiert. Diese gliedern sich in methodische und technische Anforderungen, wobei methodische Anforderungen die Voraussetzungen im Bereich der Konstruktion und Entwicklung und die technischen Anforderungen die wesentlichen Funktionen der eigentlichen Simulationsumgebung beschreiben.

### 4.2 Methodische Anforderungen

Moderne Produktionsanlagen zeichnen sich durch den effizienten Einsatz verschiedener Technologien aus den Bereichen der Mechanik, der Elektrik und der Informatik aus. Die dadurch entstehende Komplexität stellt die Unternehmen vor die Herausforderung, die unterschiedlichen Fachrichtungen in einem strukturierteren Entwicklungsprozess zu vereinen, um die anspruchsvollen Problemstellungen der Kunden optimal lösen zu können.

Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist die Verwendung von Computer-Aided-Engineering (CAE)- und CAD-Softwaresystemen für das Management der anfallenden Konstruktionsdaten, um den beteiligten Konstrukteuren und Entwicklern zu jeder Zeit eine konsistente Datenbasis zur Verfügung stellen zu können. Andernfalls können wichtige Änderungen verloren gehen bzw. müssen manuell in gemeinsamen Besprechungen nachgepflegt werden.

Der Einsatz von Physikmodellen zur Simulation von Produktionsanlagen hat neben der Steigerung der Aussagekraft das Ziel, die Modellerstellung zu automatisieren und so den Aufwand zu reduzieren. Diese Automatisierung lässt sich nur umsetzen, wenn die erforderlichen Daten in digitaler Form (z. B. Geräteliste einer Produktionsanlage) vorliegen. Je größer der Anteil der digital verfügbaren Daten ist, desto leichter ist eine automatisierte Modellerstellung umzusetzen (siehe Abbildung 4-1). Recherchen im Rahmen von Studienarbeiten haben gezeigt, dass derzeit in den Unternehmen nur eine Teilautomatisierung möglich ist, weil die notwendigen Datenbanken oft noch nicht existieren bzw. sich gerade erst im Aufbau befinden.

Ein weiteres Problem beim Datenmanagement ist eine häufig heterogene Systemlandschaft in den Unternehmen, die über Jahrzehnte gewachsen ist. Für die Einführung einer automatisierten Modellerstellung müssen die verschiedenen Softwarewerkzeuge auf eine gemeinsame Datenbasis synchronisiert bzw. entsprechende Schnittstellen für den Datenaustausch definiert und umgesetzt werden.

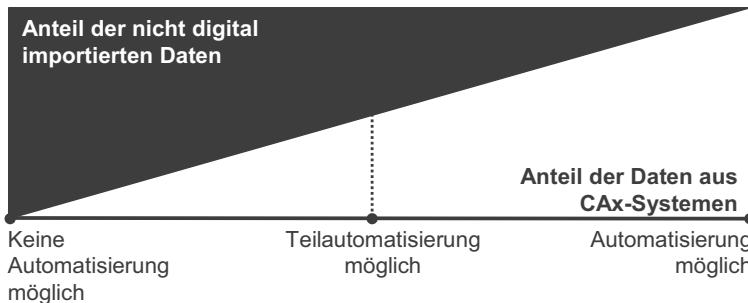


Abbildung 4-1: *Zusammensetzung der für ein Physikmodell benötigten Daten und die Möglichkeiten der Automatisierung der Modellerstellung*

Für die Erstellung eines Physikmodells einer Produktionsanlage müssen folgende Informationen über die einzelnen Bauteile der zu simulierenden Produktionsanlage bekannt sein:

- Geometrie
- Masse
- Schwerpunkt
- Trägheitsmomente (Verteilung der Masse um den Schwerpunkt)
- Reibungskoeffizienten der Flächenpaarungen

Sofern in den Unternehmen bereits eine 3-D-CAD-Software zur Konstruktion eingesetzt wird, kann die Geometrie eines Bauteils daraus übernommen werden. Es ist zwar in den meisten Fällen eine Vereinfachung des Modells erforderlich, diese kann aber mit einem Softwarewerkzeug in sehr kurzer Zeit durchgeführt werden. Wenn in den Unternehmen ein 2-D-CAD-System zum Einsatz kommt, muss die Komponente in 3-D nachkonstruiert werden, was zusätzlichen Aufwand bei der Modellerstellung zur Folge hat. Die anderen Parameter des Physikmo-

dells sind derzeit selten in Konstruktionsdatenbanken hinterlegt, was zur Folge hat, dass diese zukünftig etwas erweitert werden müssten. Die erforderlichen Daten können entweder durch Messungen bestimmt oder in den Spezifikationen der Hersteller gefunden werden.

## 4.3 Technische Anforderungen

### 4.3.1 Physiksimulation

Für die Simulation von Produktionsanlagen muss die Physiksimulation einige wichtige Anforderungen erfüllen. Die Kollisionserkennung muss auf polygonalen Modellen basieren, da die verwendeten Bauteile in einer Produktionsanlage meist geometrisch durchaus komplexe Formen aufweisen. Eine Nachbildung einer Produktionsanlage mit Standardgeometrien wäre an dieser Stelle zu aufwendig und würde zu verfälschten Ergebnissen führen.

Des Weiteren muss die Kollisionsbehandlung stabil dauerhafte Kontakte zwischen Objekten berechnen können. In einer Produktionsanlage werden Werkstücke von einer Bearbeitungsstation zur nächsten befördert. Dieser Transport wird von entsprechenden Fördereinrichtungen übernommen und wird in den meisten Fällen mit einem direkten Kontakt auf das Werkstück umgesetzt. Dadurch entsteht ein dauerhafter Kontakt zwischen Werkstück und Fördereinrichtung, der auch in der Physiksimulation nachgebildet werden muss.

### 4.3.2 Integration der Sensoren

Automatisierte Produktionsanlagen nutzen zur Steuerung und Überwachung des Bewegungsablaufes verschiedenste Sensoren. Sensoren sind nach SCHNELL et al. 1991 Messfühler, welche mechanische, chemische, thermische, magnetische und optische Werte in elektrische Signale umformen. Die einsetzbare Palette an Sensoren in der Automatisierungstechnik reicht mittlerweile von einfachen Kontakt- und Näherungssensoren über Lichtschranken und Laserscanner bis hin zu bildverarbeitenden Systemen. Um bei einer Simulation den Regelkreis mit der Steuerung schließen zu können, muss auch die Sensorik einer Produktionsanlage entsprechend abgebildet werden. Aus diesem Grund muss eine geeignete Simulationsumgebung über virtuelle Sensoren verfügen, die im Simulationsmodell eingebunden werden können. Wenn diese virtuellen Sensoren in der Simulation ausgelöst werden, melden sie ein Signal an die Steuerung. Bereits SCHUSTER

1992 verwendete das Konzept der virtuellen Sensoren für die Simulationsumgebung USIS (Universal Simulation System), das in den 1990er Jahren am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München (*iwb*) entwickelt wurde. Er teilte die Sensoren nach Komplexität ein:

1. Ebene: einfache, schaltende Sensoren (z. B. Kontaktschalter)
2. Ebene: Messende Sensoren (z. B. Abstandssensor)
3. Ebene: Intelligente Sensoren (z. B. Bildverarbeitung)

In USIS wurde der Messstrahl eines Sensors vereinfacht als Kollisionsobjekt abgebildet (SCHUSTER 1992, S. 66-68).

### 4.3.3 Integration von Gelenken

Neben der Geometrie muss auch das Bewegungsverhalten der Produktionsanlage in der Simulationsumgebung abgebildet werden, zumal dieses auch Auswirkungen auf die anderen Objekte (z. B. Werkstücke) haben kann. Das Kinematikmodell steht somit in direktem Zusammenhang mit dem Physikmodell, während es bei einer herkömmlichen virtuellen Inbetriebnahme völlig losgelöst betrachtet werden kann (ZÄH et al. 2004a).

Für die Simulation der beweglichen Teile einer Produktionsanlage eignen sich Gelenke, um den Bewegungsbereich einzuschränken und Bewegungsrichtungen vorzugeben (siehe 3.3.4.2). Aus diesem Grund müssen für die Simulation verschiedene Gelenkkarten von der Simulationsumgebung zur Verfügung gestellt werden.

### 4.3.4 Simulationszyklus

Mit der Simulationsumgebung sollen Steuerungsprogramme getestet werden können, die auf einer SPS ablaufen. Diese SPS werden in Produktionsanlagen meist mit einer Zykluszeit von 10 ms betrieben. Die Simulationszykluszeit der Simulationsumgebung muss kleiner als die Zykluszeit der zu testenden Steuerung sein, um den Funktionsablauf korrekt simulieren zu können, d. h. die Simulationszykluszeit muss während der kompletten Simulation 10 ms unterschreiten.

### 4.3.5 Schnittstellen

In Abschnitt 3.4.1 wird der Ansatz des skalierbaren Engineerings vorgestellt. Um auch die Simulationsumgebung mit Physikmodellen hierfür nutzen zu können, ist es erforderlich, dass die Simulationsumgebung über definierte Schnittstellen mit anderen Softwarewerkzeugen kommunizieren kann. Zum Beispiel kann es sinnvoll sein, über das Netzwerk ein Bedienfeld einer Maschine oder Anlage einzubinden und somit zur Interaktion zu nutzen. Auch externe Software zur Berechnung des Verhaltens der einzelnen Komponenten (z. B. MATLAB®) soll über diese Kommunikationsschnittstelle an die Simulationsumgebung gekoppelt werden können.

### 4.3.6 Skalierbare Lösung

Um eine möglichst hohe Akzeptanz der Simulationsumgebung zu erreichen, ist es wichtig, eine skalierbare Lösung anbieten zu können. D. h. es müssen bei der Ein- und bei der Ausgabe verschiedenartige Geräte unterstützt werden, damit das System sowohl kostengünstig an einem Büroarbeitsplatz als auch an einer Projektionswand eingesetzt werden kann. Die Simulationsumgebung muss deshalb leicht zu konfigurieren sein, so dass die verschiedenen Möglichkeiten der Ein- und Ausgabe aufwandsarm hinzugefügt und parametriert werden können.

### 4.3.7 Konfigurierbarkeit der Simulationsszene

Da in den meisten Unternehmen nicht nur eine Produktionsanlage, sondern mehrere gleichzeitig entwickelt und gebaut werden, wird auch an die Simulationsumgebung die Anforderung gestellt, möglichst schnell von einem Simulationsmodell auf ein anderes umstellen zu können. Hierfür ist es erforderlich, dass die Simulationsszenen einfach und schnell konfiguriert werden können und dass zwischen den Szenen schnell gewechselt werden kann. Deshalb muss die Simulationsumgebung gängige Datenformate für polygonale Modelle (z. B. VRML) laden können und auch die entsprechenden Zusatzinformationen (z. B. Masse der Bauteile) für das Simulationsmodell mit einer standardisierten Schnittstelle bereitstellen können. Ein Konfigurator für das Einrichten der virtuellen Szene könnte den Benutzer hierbei unterstützen und dabei eine für die Schnittstelle lesbare Konfigurationsdatei erzeugen.

### 4.3.8 Interaktion

Bislang waren die Interaktionsmöglichkeiten bei einer virtuellen Inbetriebnahme durch eine 2-D-Benutzeroberfläche sehr stark eingeschränkt. Nur mit hohem Fachwissen über die Produktionsanlage konnten die Simulation durchgeführt und die Ergebnisse richtig interpretiert werden. Zukünftig sollen eine stereoskopische Ausgabe und die Verwendung verschiedener Ausgabegeräte möglich sein. Die Skalierung soll hierbei von einer Monitorlösung bis hin zu einer Einseitenprojektion reichen. Durch den Einsatz der VR-Technik bei der Ausgabe wird das Verständnis der Anlage durch eine geeignete 3-D-Visualisierung erleichtert. Langfristig soll auch die Eingabe mit den Methoden der VR (z. B. Verwendung eines Datenhandschuhs oder Head-Tracking) verbessert und damit die Testdurchführung beschleunigt werden.

## 4.4 Bewertung der Anforderungen

In dieser Arbeit soll die generelle Machbarkeit einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen unter Beweis gestellt werden. Die methodischen Anforderungen sind Voraussetzungen, die in den Unternehmen erfüllt sein müssen, um eine derartige Simulationsumgebung einsetzen zu können. Die beschriebenen technischen Anforderungen umfassen mehr an Funktionalität als für den angestrebten Beweis der Machbarkeit notwendig ist. In Tabelle 4-1 sind die Anforderungen nach ihrer Priorität geordnet aufgelistet:

Anforderung	Priorität	Potenzial
Physiksimulation	++	+
Integration von Sensoren	++	+
Integration von Gelenken	+	+
Simulationszyklus	+	+
Schnittstellen	+	+
Skalierbare Lösung	0	++
Konfigurierbarkeit der Simulationsszene	0	+
Interaktion	0	++

Erklärung: ++ hoch, + mittel, 0 gering

Tabelle 4-1: Klassifizierung der Anforderungen und deren Nutzenpotenzial

Die hochprioreären Anforderungen bieten ein nicht ganz so großes Nutzenpotenzial, da sie die Basis und somit Grundvoraussetzung einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen sind. Die weniger prioreären Anforderungen dagegen weisen ein wesentlich höheres Potenzial auf und sind für den Erfolg einer derartigen Simulationsumgebung sehr wichtig, für einen Beweis der Machbarkeit aber nicht von so hoher Priorität. Auf Basis der Anforderungsanalyse wurde ein Konzept und ein Systementwurf erstellt, welche im folgenden Kapitel näher beschrieben werden.



## 5 Konzept und Systementwurf

### 5.1 Allgemeines

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Anforderungen für eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen erläutert. In den folgenden Abschnitten werden auf Basis dieser Anforderungen ein Konzept und ein Systementwurf beschrieben. Zunächst werden die Möglichkeiten zur Erstellung der notwendigen Simulationsmodelle diskutiert, danach wird der eigentliche Systementwurf für eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen vorgestellt.

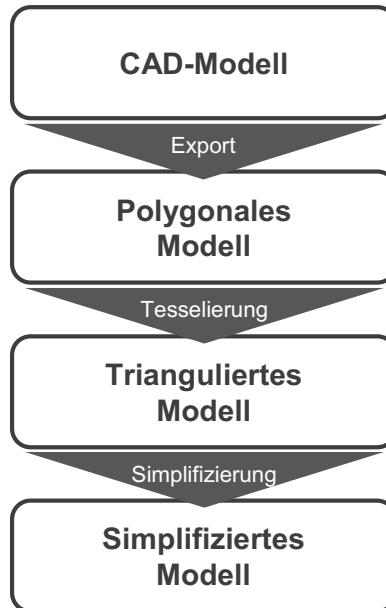
### 5.2 Modellerstellung

#### 5.2.1 Erstellung des Visualisierungsmodells

Das Visualisierungsmodell ist für eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen von hoher Bedeutung, weil die Ergebnisse aus den Physikberechnungen auf das Visualisierungsmodell übertragen werden müssen, um sie für den Benutzer erfassbar machen zu können. Außerdem ist sowohl im Visualisierungsmodell als auch im Physikmodell die vollständige Geometrie der Produktionsanlage abgebildet. Um fehlerhafte Darstellungen (z. B. nicht erkennbare Kollisionen) zu vermeiden, muss deshalb der Geometrianteil beider Modelle in jedem Simulationsschritt konsistent sein.

Das Visualisierungsmodell wird aus den CAD-Daten der Produktionsanlage gewonnenen (siehe Abbildung 5-1). Die Daten sind im CAD-System in einem eigenen Format gespeichert, weshalb ein direkter Austausch unter den verschiedenen Systemen nicht möglich ist. Aus diesem Grund haben sich verschiedene Austauschformate (z. B. IGES, STEP) etabliert, welche von den meisten CAD-Systemen unterstützt werden. Diese Formate bilden die hinter den Konstruktionen liegenden mathematischen Funktionen (z. B. Bezierkurven) ab, so dass die CAD-Modelle ohne Genauigkeitsverlust übertragen werden können. Diese Modelle sind jedoch nicht für die Visualisierung und Interaktion in der VR geeignet, weil moderne Grafikkarten auf die Darstellung von Dreiecken optimiert sind. Daher ist es sinnvoll, zunächst ein polygonales Modell aus dem CAD zu exportieren (z. B. VRML97) und dieses dann mittels eines Tesselationsverfahrens (z. B. Triangulation) für die Darstellung zu optimieren. Vor allem bei größeren

Modellen ist eine Vereinfachung notwendig, um die Simulation an einzelnen Simulationsrechnern ausführen zu können und nicht auf teure Rechencluster oder Hochleistungsrechner ausweichen zu müssen. Diese Vereinfachung der Modelle und der damit verbundene Genauigkeitsverlust sind so durchzuführen, dass die wesentlichen geometrischen Eigenschaften des Modells erhalten bleiben. Eine zu starke Reduzierung der Anzahl der Polygone könnte andernfalls eine Minderung der Aussagekraft zur Folge haben.



*Abbildung 5-1: Vierstufiges Verfahren zur Erstellung eines VisualisierungsmODELLS für den Einsatz in einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen*

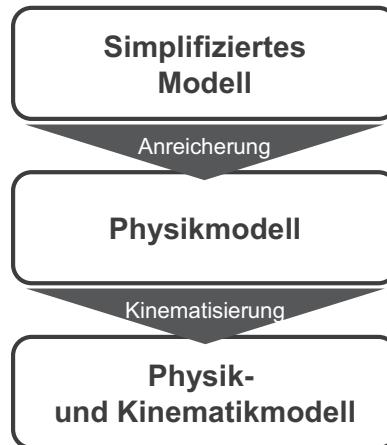
Das beschriebene vierstufige Verfahren zur Erstellung eines VisualisierungsmODELLS kann rechnerunterstützt in wenigen Arbeitsschritten durchgeführt werden. Mit einer entsprechenden Definition der Schnittstellen zwischen den einzelnen Stufen könnte das Verfahren auch automatisiert ablaufen, wodurch je nach Modellgröße die Erstellung in wenigen Minuten abgeschlossen werden kann.

Die in einer Produktionsanlage zu befördernden und zu bearbeitenden Werkstücke werden meist nicht im CAD-System des Herstellers konstruiert, so dass diese Modelle entweder vom späteren Betreiber der Produktionsanlage zur Verfügung gestellt oder neu entwickelt werden müssen. Auch diese Modelle müssen über den beschriebenen Ansatz zu einem triangulierten Modell konvertiert werden. Bei größerer Komplexität ist auch eine Simplifizierung zu empfehlen, da die Werkstücke häufig in hoher Stückzahl in einer Produktionsanlage transportiert und verarbeitet werden und so einen erhöhten Rechenaufwand bei der Simulation beanspruchen.

### 5.2.2 Erstellung des Physik- und Kinematikmodells

In diesem Abschnitt wird der gewählte Ansatz für die Erstellung des Physikmodells vorgestellt (siehe Abbildung 5-2). Ausgangspunkt dafür ist das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene simplifizierte Geometriemodell, um die Konsistenz zwischen Physikmodell und Visualisierungsmodell sicherstellen zu können.

Neben der reinen Geometrie ist für die Erstellung eines Physikmodells vor allem die Parametrierung der einzelnen Objekte des Modells mit den physikalischen Eigenschaften von hoher Bedeutung. Bislang ist in den Unternehmen keine Datenbasis vorhanden, in der die physikalischen Eigenschaften der in der Produktionsanlage verbauten Komponenten erfasst sind. Deshalb müssen die Daten zunächst aus den Spezifikationen der Hersteller und aus Nachschlagewerken gewonnen und aufbereitet werden. Um das simplifizierte Modell mit den physikalischen Daten anreichern zu können, gibt es zwei verschiedene Lösungsansätze. Der einfachere und kurzfristig umsetzbare Weg ist, die Daten mittels einer Konfigurationsdatei den einzelnen Objekten des Simulationsmodells zuzuordnen. Langfristig ist die Speicherung der Daten im PDM-System zu empfehlen, um diese dann bauteilbezogen ablegen und eine manuelle Zuordnung durch einen definierten Export ersetzen zu können.



*Abbildung 5-2: Erstellung des Physik- und Kinematikmodells, aufbauend auf dem simplifizierten Geometriemodell des vorhergehenden Abschnitts*

Zusätzlich zu den physikalischen Eigenschaften muss das Bewegungsverhalten der Produktionsanlage in das Physikmodell integriert werden. Dies geschieht mithilfe verschiedener Gelenke, die als Verbindungen zwischen den Einzelobjekten eingesetzt werden. Je nach Gelenkart ist eine spezielle Konfiguration erforderlich, da die Einschränkung der Freiheitsgrade, die durch die Gelenke bewirkt wird, parametrisiert werden muss. Nach Abschluss dieser Kinematisierung kann das Physik- und Kinematikmodell in einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen eingesetzt werden.

Neben dem Physikmodell der Produktionsanlage muss auch die virtuelle Welt, in der die Simulation abläuft, eingerichtet werden. In vielen Physiksimulationen können außer der Gravitation weitere Umwelteinflüsse (z. B. Wind) eingestellt werden. Für die Simulation im produktionstechnischen Umfeld sind jedoch andere Einflüsse als die Gravitation zu vernachlässigen, denn die zu simulierenden Produktionsanlagen werden meist in geschlossenen Hallen betrieben.

### 5.2.3 Integration von Sensoren

In Abschnitt 4.3.2 wurde die Integration von Sensoren für die Automatisierungs-technik durch den entsprechenden Einsatz virtueller Sensoren gefordert und der Ansatz von SCHUSTER 1992 vorgestellt. Das beschriebene Vorgehen wird im Folgenden an einem einfachen Beispiel näher erläutert.

In Abbildung 5-3 wird der Aufbau einer Reflexionslichtschranke in einer Beförderungsanlage als Beispiel für einen Sensor in der Automatisierungstechnik gezeigt. Die Lichtschranke schickt bei Unterbrechung des Lichtstrahls, d. h. wenn der Lichtstrahl zwar gesendet, aber nicht empfangen wird, ein Signal an die angeschlossene Steuerung. Diese Art von Sensoren werden zur groben Lageerkennung eingesetzt, um so den weiteren Ablauf in der Produktionsanlage steuern zu können.

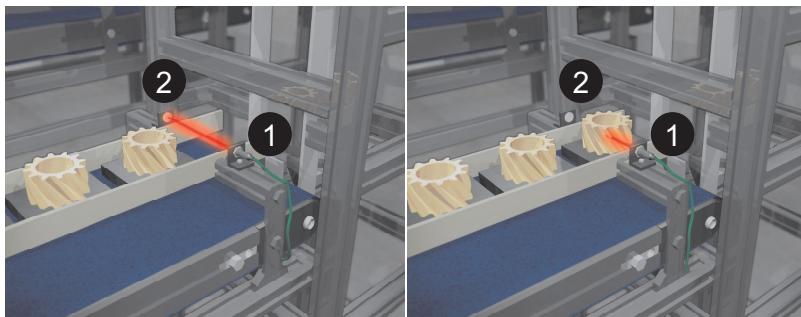


Abbildung 5-3: *Reflexionslichtschranke – Sender und Empfänger (1) sind in einem Gehäuse verbaut, der Lichtstrahl wird durch einen Reflektor (2) zurückgelenkt.*

In Abbildung 5-4 ist die Integration einer Reflexionslichtschranke in die Simulation mithilfe eines Kollisionsobjektes dargestellt. Hierbei wird der Lichtstrahl als durchdringbares Kollisionsobjekt behandelt, d. h. immer wenn der Lichtstrahl von einem virtuellen Objekt durchdrungen wird, wird die Kollision erkannt und ein Signal an die Steuerung gesendet. Bei diesem Ansatz ist weder die Abbildung des Senders oder des Empfängers noch die des Reflektors notwendig, zum besseren Verständnis werden jedoch vereinfachte Geometrien angezeigt. Der Arbeitsbereich des Sensors kann durch die geometrischen Eigenschaften des zugehörigen Kollisionsobjektes festgelegt werden.

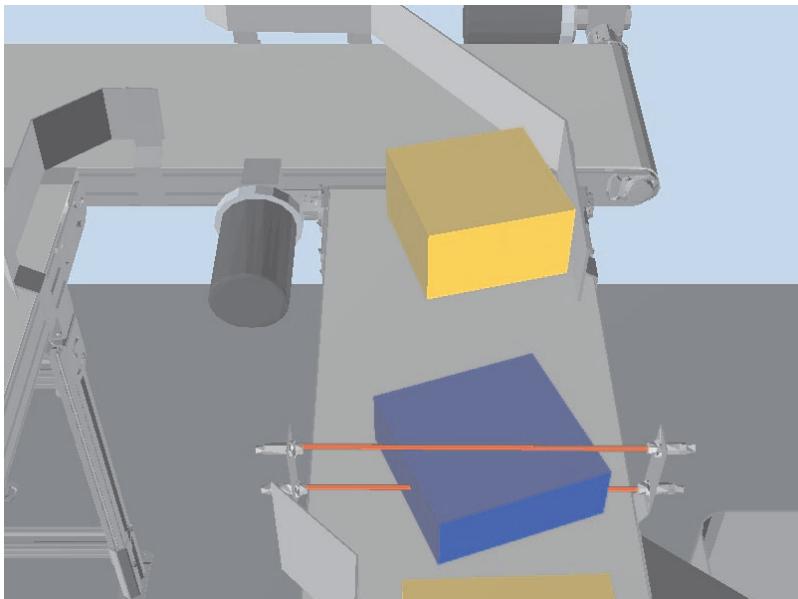


Abbildung 5-4: Beispielhafte Integration einer doppelten Reflexionslichtschranke als Kollisionsobjekt in der Simulation

## 5.3 Simulationsumgebung mit Physikmodellen

### 5.3.1 Konfiguration

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Erstellung der Simulationsmodelle für die Physiksimulation näher beschrieben. Um eine Simulation durchführen zu können, müssen die Modelle in der Simulationsszene realitätsgerecht angeordnet werden. Hierzu müssen die Positionen der einzelnen Objekte dem Aufstellplan der Produktionsanlage entsprechend definiert werden. Es ergibt sich somit eine Objektbeschreibung, die sich, neben dem Namen zur Identifizierung, aus den Geometrieeigenschaften, den physikalischen Eigenschaften und der Lage (Position und Orientierung) des Objektes zusammensetzt (siehe Abbildung 5-5). Zusätzlich muss auch die Quelle des Materialflusses, d. h. die Startposition der Werkstücke und der zeitliche Abstand, festgelegt werden.

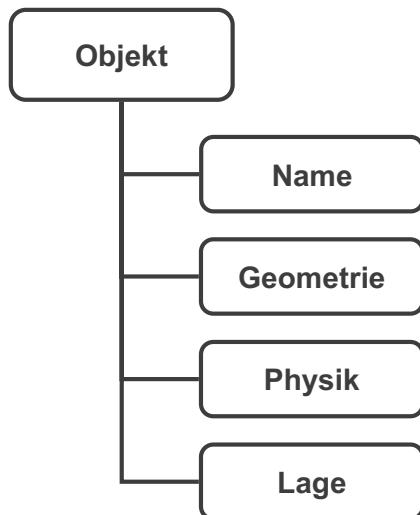


Abbildung 5-5: Beschreibung eines Objektes – Definition der Objekteigenschaften

Eine Konfiguration besteht aus beliebig vielen Beschreibungen von Objekten und kann gespeichert und somit wiederverwendet werden, so dass Simulationen immer wieder mit demselben Startzustand durchgeführt werden können.

Durch den Einsatz eines Konfigurationstools kann durch eine visuelle Darstellung der Einrichtungsprozess unterstützt und auch eine Veränderung der Objekteigenschaften während der Simulation ermöglicht werden.

### 5.3.2 Parallelisierung

In Kapitel 4 wurden die Anforderungen an eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen beschrieben. Der Datenaustausch mit externen Programmen, die Interaktion des Benutzers und die eigentliche Physiksimulation erfordern einen parallelisierten Programmablauf, um die zur Verfügung stehende Rechenleistung moderner Prozessoren mit mehreren Kernen optimal nutzen zu können. Abbildung 5-6 zeigt die wichtigsten Threads einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen. Eine zentrale Rolle kommt hierbei dem sogenannten Kernel (Hauptthread) zu, der die anderen Threads startet, synchronisiert und bei Bedarf

auch beendet. Neben der Synchronisation ist der Kernel für die Verwaltung des zentralen Szenengraphen, die hierarchische Abbildung der darzustellenden Szene, zuständig.

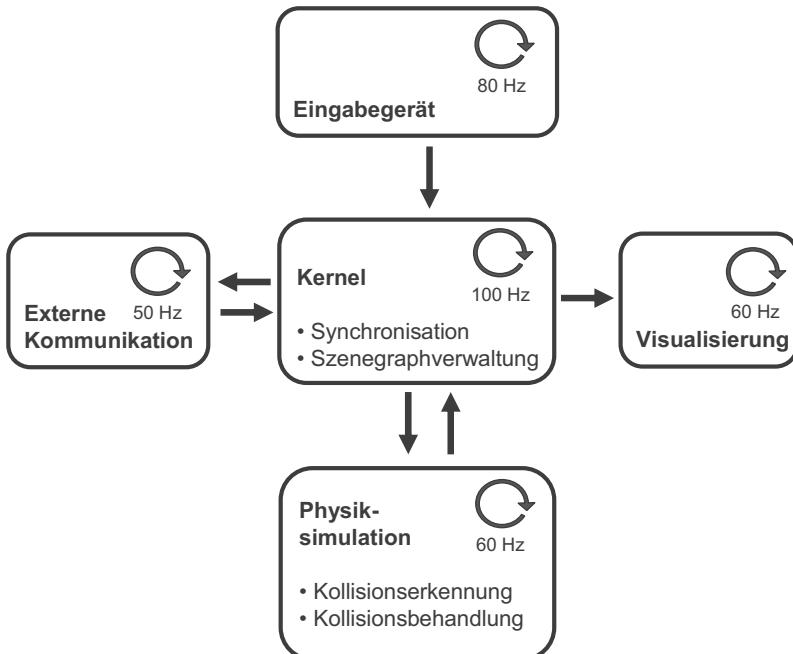


Abbildung 5-6: Parallelisierung der Systemprozesse

Der Thread für die Physiksimulation übernimmt die Berechnung der Kollisionserkennung und -behandlung. Ein Aspekt der Entkopplung der Physiksimulation ist die Möglichkeit, bei knapp werdenden Hardwareressourcen (CPU-Leistung), was bei größeren Simulationsszenarien auftreten kann, den Prozess auf einen anderen Rechner oder ein Cluster von Rechnern auszulagern. Bei Verteilung auf mehrere Rechner muss jedoch die entstehende Latenzzeit durch die notwendige Kommunikation zwischen den Rechnern beachtet und in die Berechnung miteinbezogen werden.

Multithreading kann nur korrekt implementiert werden, wenn einige wichtige Regeln bei der Programmierung eingehalten werden. Vor allem die Threadsicherheit muss gewährleistet sein, d. h. der Zugriff auf die verschiedenen Daten-

objekte muss durch definierte Verfahren der Interprozesskommunikation (z. B. Mutex, Lock, Semaphore, Monitor) geschützt werden, damit Inkonsistenzen in den Datenobjekten und Verklemmungen (engl. Deadlocks) im Programmablauf ausgeschlossen werden können.

### 5.3.3 Auswahl von Kollisionserkennung und -behandlung

Auf Basis der in Kapitel 4 gestellten Anforderungen wird im Folgenden der gewählte Ansatz für die Kollisionserkennung und -behandlung näher beschrieben.

Um eine möglichst hohe Akzeptanz in den Unternehmen zu erreichen, soll die Simulationsumgebung betriebssystemunabhängig eingesetzt werden können. Aus diesem Grund muss auch bei der Wahl der verwendeten Bibliotheken auf plattformunabhängige Varianten zurückgegriffen werden. Ferner sollten die in den Bibliotheken genutzten Algorithmen offengelegt sein, um eine Nachvollziehbarkeit der Berechnung und damit eine Vergleichbarkeit garantieren zu können.

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, kann die Physiksimulation in Kollisionserkennung und -behandlung eingeteilt werden. Auch bei der Wahl des Berechnungsverfahrens können die beiden Phasen getrennt voneinander betrachtet werden, d. h. es könnten auch unterschiedliche Bibliotheken mit definierten Schnittstellen zum Einsatz kommen.

Für die Kollisionserkennung wird die Berechnung auf Basis von polygonalen Modellen gewählt. Auch wenn diese Variante bei komplexen Geometriemodellen sehr viele Rechenoperationen erfordert kann, so führt eine Vereinfachung der Modelle zu Ungenauigkeiten der Simulationsergebnisse, die im industriellen Einsatz nicht akzeptabel sind. Um die Anzahl der Berechnungen bei der Kollisionserkennung minimieren zu können, werden als Hüllkörper AABBs (siehe Abschnitt 3.3.3) verwendet, da der geringe Speicherbedarf sich bei großen Simulationsszenen positiv auswirkt und auch eine Erweiterung der Hüllkörper für deformierbare Objekte einfach umgesetzt werden kann. Für die Erlangung der eigentlichen Kollisionsinformation eignet sich für diesen Einsatz vor allem der GJK-Algorithmus (siehe Abschnitt 3.3.4), der sowohl die Durchdringungstiefe als auch die Oberflächennormale an den Kontaktstellen der kollidierenden Körper direkt berechnet. Darüber hinaus kann der GJK-Algorithmus als robust bezeichnet werden, weshalb eine zuverlässige Berechnung der Kollisionsinformationen garantiert werden kann.

Nach einer erkannten Kollision muss eine entsprechende Kollisionsbehandlung zur Auflösung berechnet werden. Hierfür wird für die Simulation von Produktionsanlagen ein Ansatz mit Zwangsbedingungen aus der Starrkörper-simulation eingesetzt, weil bei der Simulation des Materialflusses häufig dauerhafte Kontakte abgebildet werden müssen (z. B. Transport auf einem Förderband). Zusätzlich ist es wichtig, dass durch die Verwendung eines einstellbaren Integrators eine definierte Zykluszeit bei der Berechnung erreicht wird, um die Simulationsumgebung der von der Steuerung vorgegebenen Taktzeit anpassen zu können. Ferner werden für die Simulation von Produktionsanlagen auch Gelenke benötigt, um die Verfahrwege einzelner Komponenten einer Produktionsanlage und so das Bewegungsverhalten simulieren zu können. Von den Simulationsbibliotheken werden meist schon wichtige Gelenkkarten bereitgestellt, mit denen viele Bewegungen abgebildet werden können. Sollten diese Gelenke nicht ausreichen, um alle Bewegungen einer Produktionsanlage nachzustellen zu können, ist es erforderlich, dass durch eine Programmierschnittstelle vorhandene Gelenkkarten erweitert oder neue entwickelt werden können.

Durch den Einsatz einer Abstraktionsschicht, wie zum Beispiel des Physical Abstraction Layer (PAL), kann der Austausch der Simulationsbibliotheken weiterhin gewährleistet werden (PAL 2008). Durch eine derartige Programmierschnittstelle können mehrere verschiedene Simulationsbibliotheken ohne Programmieraufwand ausgetauscht werden. Dies ermöglicht zum einen Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Berechnungsverfahren, zum anderen ist später eine Umstellung auf andere Berechnungsverfahren aufwandsarm möglich (BOEING & BRÄUNL 2007).

### **5.4 Eingabe**

Wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, wird bei der Interaktion zwischen Navigation, Selektion, Manipulation und Applikationssteuerung unterschieden.

In einer ersten Stufe ist vor allem die Umsetzung der Navigation in der Simulationsumgebung wichtig, um die zu untersuchende Produktionsanlage und deren Verhalten detailliert analysieren zu können. Hierzu ist es notwendig, dass die virtuelle Kamera („Auge des Betrachters“) sowohl um als auch durch die virtuelle Szene geführt werden kann (siehe Abbildung 5-7).

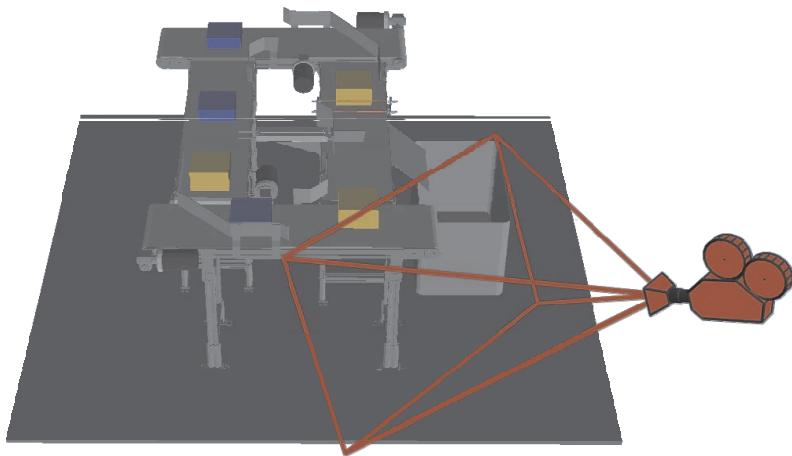


Abbildung 5-7: 3-D-Navigation in der Simulationsumgebung zur Analyse der Produktionsanlage

Erst in einer zweiten Stufe ist es erforderlich, mittels Selektion und Manipulation in den Simulationsablauf der Produktionsanlage einzugreifen. Durch die direkte Interaktion während der Simulation können verschiedene Fehlerfälle (z. B. Materialflusstau) vom Benutzer sehr einfach und intuitiv nachgestellt werden. Hierzu werden die entsprechenden Simulationsobjekte mit dem Cursor durch Kollision (Picking) selektiert.

Später kann der Eingriff in den Simulationsablauf noch weiter verbessert werden, indem z. B. haptische Eingabegeräte integriert werden. Es bietet sich an, die Arbeiten von EGERMEIER 2008 in die Simulationsumgebung zu integrieren, da zum einen durch das haptische Greifen in der VR die Interaktion deutlich an Realitätsnähe gewinnt und zum anderen die technische Umsetzung aufgrund definierter Schnittstellen mit vertretbarem Aufwand möglich ist. In einem ersten Entwurf ist die Integration jedoch nicht erforderlich, weil grundsätzlich zwar die Interaktion verbessert wird, die Aussagekraft der Simulation aber nicht gesteigert wird.

Die eigentliche Applikationssteuerung beschränkt sich zunächst auf wenige Funktionen (z. B. Zurücksetzen der Simulationsszene und Beenden der Anwendung). Diese Funktionen könnten über eine Art virtuelle Menüsteuerung direkt

aus der Simulationsumgebung heraus aufgerufen werden. Da die Aktionen nicht in direktem Zusammenhang mit dem Simulationsablauf stehen, können diese Funktionen auch über eine Tastaturbelegung abgedeckt werden.

### **5.5 Ausgabe**

In Abschnitt 4.3.8 wurde gefordert, dass die Simulationsumgebung sowohl einen monoskopischen Monitor als auch eine stereoskopische Projektionswand als Ausgabemedium unterstützt. Grundsätzlich sollen die beiden verschiedenen Ausgabeverfahren Monoskopie und Stereoskopie umgesetzt werden. Im Konzept muss deshalb zwischen der Implementierung auf Software- und Hardwareseite unterschieden werden.

In der Software werden beide Ausgabeverfahren von vielen Grafikbibliotheken unterstützt. Bei der Monoskopie wird das Bild der virtuellen Kamera aus der Simulation an die Grafikkarte des Rechners übertragen. Bei der Stereoskopie werden zwei Bilder, eines für das linke und eines für das rechte Auge, aus der virtuellen Kameraposition berechnet und an die Grafikkarte zur Ausgabe geschickt.

Bei der Hardware ist die Umsetzung etwas komplizierter und in erster Linie von der Grafikkarte des ausgebenden Rechners abhängig. Für die monoskopische Ausgabe ist keine spezielle Grafikkarte erforderlich, da nur ein Ausgabegerät (z. B. ein Monitor) benötigt wird. Im Gegensatz dazu ist es bei der stereoskopischen Ausgabe notwendig, die Bilder für die beiden Augen getrennt voneinander auszugeben. Es existieren hierfür stereofähige Grafikkarten, die neben den Bildern auch ein Stereosignal übertragen, in dem die Information enthalten ist, für welches Auge das momentan übertragene Bild bestimmt ist. Mithilfe eines Stereo-Emitters kann dieses Signal ausgewertet und eine Shutter-Brille angesteuert werden (aktive Stereoskopie). Mittlerweile gibt es auch viele Grafikkarten, die mit zwei getrennt ansteuerbaren Ausgängen ausgestattet sind, so dass zwei verschiedene Ausgabemedien (z. B. Videobeamer mit Polarisationsfilter) geschlossen und genutzt werden können. In diesem Fall können die Bilder dem Benutzer ohne weiteren Bedarf an Hardware visualisiert werden. Dieser trägt eine Polarisationsbrille, damit das jeweilige Auge nur das Bild sehen kann, das dafür bestimmt ist. Dieses Verfahren wird auch *passive Stereoskopie* genannt und zeichnet sich durch den hohen Tragekomfort und den großen Aktionsradius für den Benutzer aus.

Die Verfahren der Stereoskopie lassen sich auch auf Mehrseitenprojektionen übertragen, wobei sich dadurch der Aufwand bezüglich der Hardware und für die Administration des Systems deutlich erhöht. Im ersten Entwurf wird deshalb eine Umsetzung für die Darstellung über einen Monitor und eine Einseitenprojektion favorisiert. Die Erweiterbarkeit auf eine Mehrseitenprojektion wird im Systementwurf jedoch berücksichtigt.

## 5.6 Zusammenfassung

In Kapitel 5 wurden das Konzept und der Systementwurf für eine Simulationsumgebung mit Physikmodellen beschrieben. Ein Schwerpunkt liegt hier auf der Erstellung der notwendigen Simulationsmodelle (Visualisierungs-, Physik- und Kinematikmodell). Eine strukturierte Modellerstellung ist die Basis, um später diesen Prozess automatisieren und somit insgesamt deutlich beschleunigen zu können. Um eine Simulation mit Physikmodellen durchführen zu können, ist außerdem eine Simulationsumgebung erforderlich, in welcher der Benutzer an den Modellen Testfälle nachstellen und so auch mit diesen Modellen interagieren kann. Die wesentliche Herausforderung ist – neben der Konfiguration der Umgebung und der Synchronisierung der verschiedenen Threads der Anwendung – die richtige Auswahl einer Bibliothek für die Kollisionserkennung und -behandlung. Für die Simulation von Produktionsanlagen ist für die Kollisionserkennung der GJK-Algorithmus am besten geeignet, da hier in einem Schritt alle benötigten Kollisionsinformationen berechnet werden können. Aufgrund der häufig auftretenden dauerhaften Kontakte zwischen Simulationsobjekten bei der Simulation von Produktionsanlagen ist die Verwendung eines Ansatzes mit Zwangsbedingungen für die Kollisionsbehandlung zweckmäßig. Andere Ansätze können dauerhafte Kontakte nur unbefriedigend auflösen, was zu verfälschten Ergebnissen führen kann. Ein weiterer Schwerpunkt des Systementwurfs liegt in der Integration moderner Interaktionsmethoden, sowohl bei der Eingabe als auch bei der Ausgabe. Auf Basis dieser Umsetzung ist es dem Benutzer möglich, leicht und schnell Fehlerfälle nachzustellen und zu analysieren.



## 6 Umsetzung und beispielhafte Anwendung

### 6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des in Kapitel 5 konzipierten Systementwurfs beschrieben. Die entwickelte Simulationsumgebung für den Einsatz von Physikmodellen trägt den Namen *Virtual Engineering Environment Extended* (Ve<sup>3</sup>) und basiert auf seinem Vorgänger Ve<sup>2</sup> (*Virtual Engineering Environment*), der von wissenschaftlichen Mitarbeitern des *iwb* im Rahmen der Forschungsinitiative *Bayerisches Kompetenznetzwerk für Mechatronik* (BKM) zwischen 2000 und 2005 entwickelt wurde (EGERMEIER & PETZOLD 2002, SPITZWEG et al. 2004, ZÄH et al. 2004d). Während Ve<sup>2</sup> vor allem für die haptische Interaktion in der VR konzipiert war, wurde bei Ve<sup>3</sup> der Schwerpunkt der Realisierung auf die Physiksimulation und die damit verbundene Modellkonfiguration gelegt. Die Möglichkeiten der haptischen Interaktion von Ve<sup>2</sup> können später aufgrund der Schnittstellendefinition in Ve<sup>3</sup> integriert werden.

Am Ende dieses Kapitels wird die Erprobung der Simulationsumgebung mit Physikmodellen für ein Beispiel beschrieben, das den Prozess der Modellerstellung und die Simulationsdurchführung verdeutlichen soll. Im folgenden Abschnitt werden zunächst der Aufbau und die Struktur des VR-Systems Ve<sup>3</sup> näher beschrieben.

### 6.2 Gestaltung und Aufbau der Systemarchitektur

#### 6.2.1 Allgemeines

Während Ve<sup>2</sup> für das Betriebssystem Linux entwickelt wurde, wurde bei der Umsetzung von Ve<sup>3</sup> die Windows-Plattform bevorzugt, weil inzwischen alle erforderlichen Bibliotheken auch für Windows erhältlich sind. Die Möglichkeit einer späteren Übertragung auf ein Linux-System wurde jedoch stets beachtet, um eventuell Tests an Hochleistungsrechnern durchführen zu können.

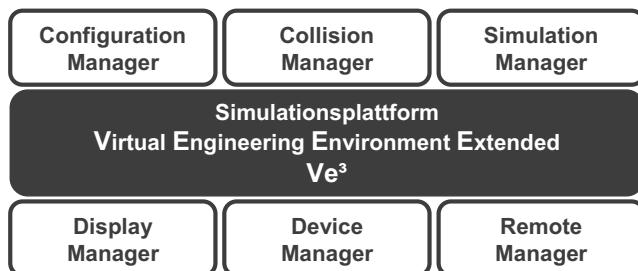
Die Umsetzung der Simulationsumgebung erfolgte in der Hochsprache C++, da sich diese Sprache aufgrund der hohen Performanz vor allem im Bereich der 3-D-Anwendungen durchgesetzt hat und zusätzlich alle wichtigen Bibliotheken (z. B. Kollisionserkennung und -behandlung) ebenfalls in C++ zur Verfügung

stehen. Dies erleichterte die Integration, weil entsprechende Schnittstellen direkt genutzt werden konnten.

Aufgrund der sehr rechenintensiven Operationen für die Simulation und der gleichzeitigen Kommunikation mit anderen Programmen über externe Schnittstellen muss die Simulationsumgebung mit nebenläufigen Programmabläufen (Multithreading) betrieben werden. Dies ist vor allem auch wichtig, um für den Benutzer eine Unterbrechung bei der Interaktion zu vermeiden.

### **6.2.2 Modulare Struktur**

Die Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup> besteht aus mehreren Modulen, um eine klare Zuordnung der Funktionalität zu erreichen und die Kommunikationswege unter den einzelnen Modulen kontrollieren zu können. Jeder Manager ist ein abgeschlossenes Softwaremodul mit festen Aufgaben (siehe Abbildung 6-1).



*Abbildung 6-1: Systemarchitektur der Simulationsplattform Virtual Engineering Environment Extended (Ve<sup>3</sup>)*

Im Folgenden werden die einzelnen Softwaremodule von Ve<sup>3</sup> näher beschrieben:

#### **Configuration Manager**

Der Configuration Manager liest aus den Konfigurationsdateien die Daten für die Konfiguration der Simulationsumgebung und der Simulationsszene aus und stellt sie während des Programmablaufs zur Verfügung. Die Konfigurationsdaten, welche zu Beginn des Programmablaufs mittels eines XML-Parsers in Ve<sup>3</sup> geladen werden, sind in einer XML-Struktur gespeichert. Für das Laden und Speichern der Konfiguration wird die Softwarebibliothek Xerces 2.8.0 verwendet.

Die entsprechenden Konfigurationsmöglichkeiten werden in Abschnitt 6.2.4 näher erläutert.

### **Collision Manager**

Die Kollisionserkennung in Ve<sup>3</sup> wird vom Collision Manager übernommen, welcher sowohl die Kollision zwischen zwei Objekten detektiert als auch im Falle einer auftretenden Kollision die Durchdringungstiefe und die Oberflächen-normalen berechnet. Diese Informationen werden dann an den Simulation Manager zur Durchführung der Kollisionsbehandlung weitergegeben. Die Berechnung erfolgt in der Collision Engine, die in einem eigenen Thread läuft und deshalb unabhängig vom Hauptthread getaktet werden kann.

### **Simulation Manager**

Auf Basis eines Algorithmus der Starrkörpersimulationen mit Zwangsbedingung wird im Falle einer Kollision vom Simulation Manager die Kollisionsauflösung berechnet. Die Kollisionsbehandlung erfolgt in einem eigenen Thread, der synchron zur Kollisionserkennung läuft.

### **Display Manager**

Der Display Manager verwaltet die verschiedenen Ausgabemöglichkeiten (z. B. stereoskopische Ausgabe auf Powerwall) von Ve<sup>3</sup>. Hierzu wird vom Display Manager eine Display Engine angelegt, die in konfigurierten Zeitabständen, entsprechend der Taktung, die Bilder der virtuellen Kamera an das angeschlossene Ausgabegerät sendet.

Die Umsetzung erfolgte mit der 3-D-Grafikbibliothek OpenSceneGraph (OSG) in der Version 2.4.0.

### **Device Manager**

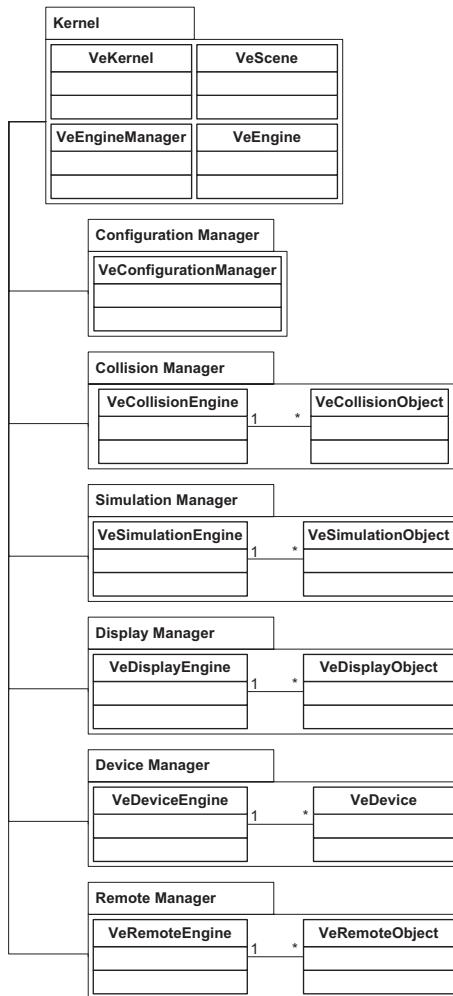
Für die Verwaltung der Eingabegeräte ist in Ve<sup>3</sup> der Device Manager zuständig. Mittels der Device Engine werden alle angeschlossenen Eingabegeräte in regelmäßigen Abständen nach neuen Daten abgefragt, die zuvor vom Eingabegerät an die jeweilige Instanz des Gerätes in Ve<sup>3</sup> übertragen wurden. Neben den verschiedenen Treibern der Eingabegeräte kommt auch die Bibliothek Simple DirectMedia Layer (SDL) in der Version 1.2.13 für die Anbindung von USB-Geräten zum Einsatz.

### **Remote Manager**

Der Remote Manager ist die Schnittstelle von Ve<sup>3</sup> zu externen Programmen, indem dieses Modul sowohl Socket-Verbindungen zu anderen Applikationen aufbauen als auch entgegennehmen kann. Auf diesem Weg können Simulationsergebnisse aus anderen Programmen (z. B. WinMOD®) zur Weiterverarbeitung empfangen werden. Die Schnittstelle verwendet hierzu das User Datagram Protocol (UDP), das verbindungslos Daten im Netzwerk transportiert und sich aufgrund der Einfachheit durch seine Schnelligkeit auszeichnet.

#### **6.2.3 Klassendiagramm**

Abbildung 6-2 zeigt ein Klassendiagramm von Ve<sup>3</sup>, in welchem zu jedem Modul die wichtigsten Klassen dargestellt sind. Der Kernel der Applikation ist das zentrale Modul, von dem die einzelnen Manager sowie die Simulationsszene gestartet und verwaltet werden. Das Diagramm beschränkt sich hierbei auf die wichtigsten Klassen jedes Moduls, weil eine komplette Auflistung aller Klassen zu umfangreich wäre.



*Abbildung 6-2:* UML-Klassendiagramm der wichtigsten Klassen der einzelnen Module von *Ve<sup>3</sup>*

### **6.2.4 Konfiguration**

Bei der Konfiguration wird in Ve<sup>3</sup> zwischen den Konfigurationen der Simulationsumgebung und der Simulationsszene unterschieden.

#### **6.2.4.1 Konfiguration der Simulationsumgebung**

Die Konfiguration der Simulationsumgebung umfasst alle Parameter, die zur Einrichtung des Systems Ve<sup>3</sup> benötigt werden. Neben globalen Einstellungen, die über die ganze Simulationsumgebung hinweg Gültigkeit haben (z. B. Protokollfunktion), werden auch lokale Einstellungen für die einzelnen Module (siehe Abschnitt 6.2.2) getroffen. Abbildung 6-3 zeigt die Konfigurationsmöglichkeiten des Moduls VeDisplay, welches die Szene dem Benutzer auf einem konfigurierten Ausgabegerät visualisiert. Neben der Art des Ausgabegerätes (eDisplayType) kann auch beispielsweise die Auflösung (displayWidth, displayHeight) vorgegeben werden.



*Abbildung 6-3: Konfiguration der Simulationsumgebung mit XML-Struktur (Auszug des XML-Schemas)*

Eine Beschreibung aller Systemparameter würde an dieser Stelle zu weit führen. Durch den Auszug aus der Systemkonfiguration soll verdeutlicht werden, dass bei der Umsetzung sehr viel Wert darauf gelegt wurde, dem Benutzer des Systems alle Einstellmöglichkeiten zu erhalten, um es seinen Bedürfnissen entsprechend anpassen zu können. Die Systemkonfiguration ist deshalb vor dem ersten Betrieb der Simulationsplattform durchzuführen und sie ist dann nur bei Veränderung der Hardwarekonfiguration zu wiederholen.

#### 6.2.4.2 Konfiguration der Simulationsszene

Im Gegensatz zur Systemkonfiguration ist die Parametrierung der Simulationsszene wesentlich dynamischer, da sie für jede neue Simulationsszene erforderlich ist.

Während die geometrische Beschreibung direkt aus dem CAD mittels VRML-Export entnommen werden kann, müssen die physikalischen Eigenschaften und kinematischen Zusammenhänge der Objekte in Ve<sup>3</sup> mittels einer XML-Struktur hinterlegt werden. Die Konfiguration der Simulationsszene setzt sich deshalb aus mehreren Komponenten zusammen, die in der folgenden Abbildung dargestellt werden:

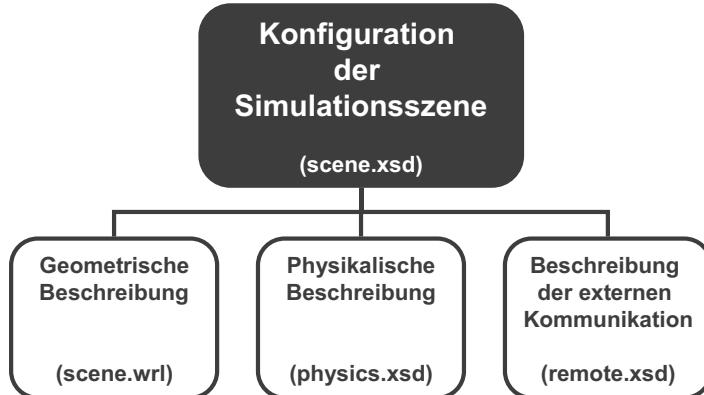


Abbildung 6-4: Komponenten der Konfiguration einer Simulationsszene

Die grundsätzliche Konfiguration wird mit dem XML-Schema scene.xsd vorgegeben. In diesem Schema wird auf die grafische Beschreibung (scene.wrl) und auf die physikalische Definition (physics.xsd) verwiesen. Die Kommunikation mit externen Anwendungen, auf die in Abschnitt 6.2.6 näher eingegangen wird, wird im Schema remote.xsd festgelegt. Im Folgenden wird die grundlegende Struktur des XML-Schemas zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften im Detail vorgestellt.

Diese Eigenschaften werden über die physikalischen Körper (bodies) definiert. Die kinematischen Zusammenhänge werden in Ve<sup>3</sup> durch Gelenke (joints) realisiert.

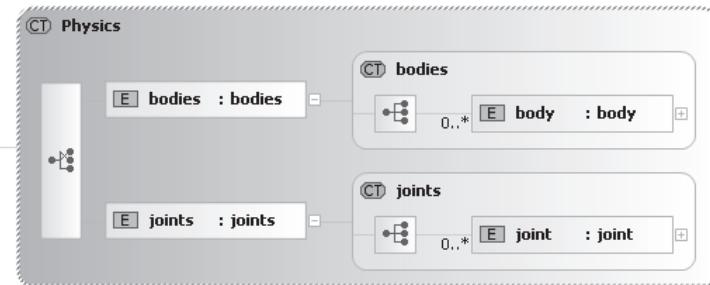


Abbildung 6-5: XML-Struktur der Konfigurationsdatei *physics.xsd* für die physikalischen Eigenschaften, Gliederung in *bodies* und *joints*

Oberstes Element des XML-Schemas für Physik und Kinematik ist das Element *Physics* vom gleichnamigen ComplexType (siehe Abbildung 6-5). Ein *Physics* Element besteht aus je einem Element *bodies* und einem Element *joints* vom gleichnamigen ComplexType. Dies stellt die beiden Gruppen der physikalischen Körper und kinematischen Eigenschaften dar.

Ein Element *bodies* besteht aus einer beliebigen Menge von Elementen vom ComplexType *body*. Ein Element *body* repräsentiert einen physikalischen Körper mit einem Namen, einem zugewiesenen geometrischen Körper und jeweils einem Element *surface* und *type* (siehe Abbildung 6-6). Das Element *surface* dient zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften des physikalischen Körpers. Dies umfasst zum Beispiel die Angabe der statischen und der kinetischen Reibung über entsprechende Parameter.

## 6 Umsetzung und beispielhafte Anwendung

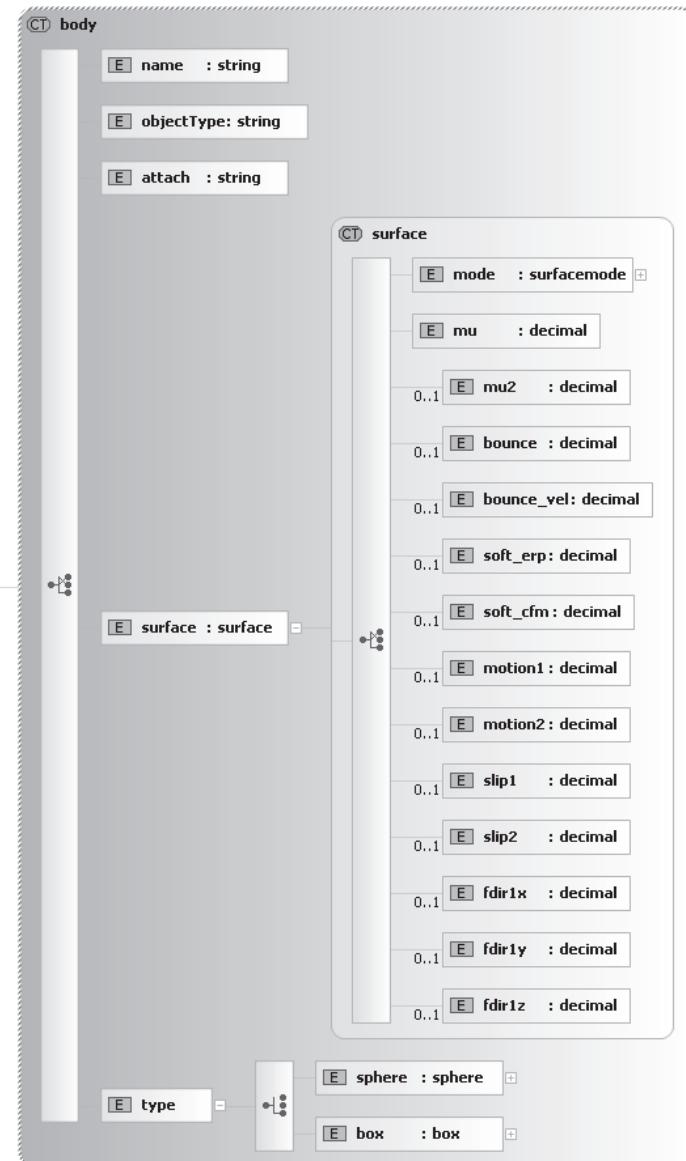


Abbildung 6-6: XML-Struktur der Konfigurationsdatei physics.xsd für die physikalischen Eigenschaften, Beschreibung body

Ein Element *joints* besteht aus einer beliebigen Menge von Elementen des ComplexType *joint*. Dieser wird durch einen Namen, zwei referenzierte physikalische Körper (*ref1* und *ref2*) und einen Typ *type* definiert (siehe Abbildung 6-7). Die zwei physikalischen Körper sind die beiden Körper, zwischen denen das Gelenk definiert ist.

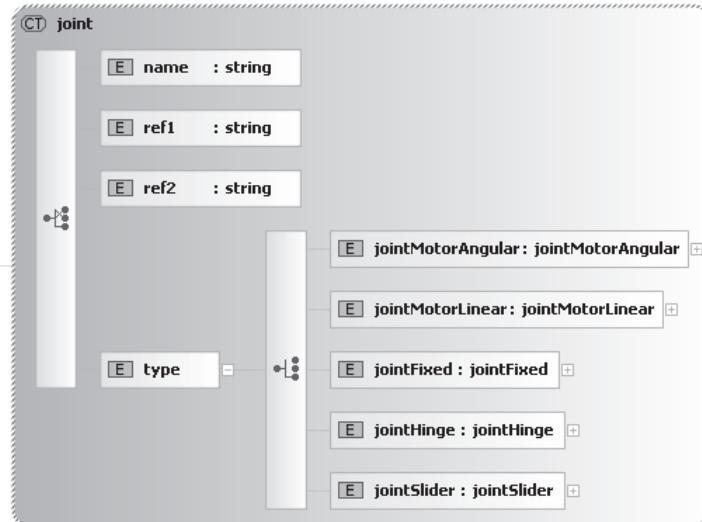


Abbildung 6-7: XML-Struktur der Konfigurationsdatei physics.xsd für die physikalischen Eigenschaften, Beschreibung joint

Durch die Definition des XML-Schemas in der beschriebenen Form können der Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup> für die Konfiguration der Simulationsszene alle notwendigen Informationen übergeben werden.

## 6.2.5 Physiksimulation in Ve<sup>3</sup>

### 6.2.5.1 Kollisionserkennung

Die Kollisionserkennung wird in Ve<sup>3</sup> vom Modul *Collision Manager* übernommen. Es kommt der polygonbasierte GJK-Algoritmus zum Einsatz, der von Gino van den Bergen in die Bibliothek „Software Library for Interference Detection“ implementiert wurde.

tion“ (SOLID) integriert wurde, da er Flexibilität für eine große Klasse von verschiedenen Objekten bietet. Mit dem Ziel, später flexible Körper simulieren zu können, ist auch die Verwendung von AABB als Hüllkörper von Vorteil, weil sich diese leicht erweitern lassen. Darüber hinaus zeichnet sich SOLID durch eine robuste und effiziente Implementierung aus. Die Verwendung des GJK-Algorithmus ermöglicht eine direkte Berechnung der Durchdringungstiefe und der Oberflächennormalen an den Durchdringungs- bzw. Kontaktstellen der kollidierenden Körper. HASEGAWA & SATO 2004 betrachten deshalb den Einsatz von SOLID für die Physiksimulation als vorteilhaft. Weitere positive Bewertungen finden sich in REGGIANI et al. 2002 und LUCIANO et al. 2004.

### **6.2.5.2 Kollisionsbehandlung**

Die Berechnung der Kollisionsbehandlung erfolgt in Ve<sup>3</sup> im Modul *Simulation Manager*, welches sich hierbei auf die Open-Source-Bibliothek ODE (siehe Abschnitt 3.3.5) stützt. Diese Bibliothek wurde ausgewählt, da zur Auflösung der Kollision ein Ansatz mit Zwangsbedingung verwendet wird, der für die Simulation dauerhafter Kontakte sehr gut geeignet ist (siehe Abschnitt 3.3.4.4). In ODE sind die Kollisionserkennung und -behandlung getrennt, so dass zur Kollisionserkennung eine andere Bibliothek (z. B. SOLID) eingesetzt werden kann, was mehr Flexibilität bei Versuchen zur Auswahl einer anderen Kollisionserkennung bietet. Zusätzlich kann ODE mit einer festen Integrator schrittweite konfiguriert werden, weshalb eine feste Zyklenzzeit garantiert werden kann. Da die entworfene Simulationsumgebung vorrangig zum Test von Steuerungstechnik gedacht ist, die selbst zyklusbasiert abläuft, muss deshalb auch eine passende Simulationsumgebung in festen Schrittweiten getaktet werden können.

Ein weiterer wichtiger Grund für die Verwendung von ODE zur Kollisionsbehandlung ist die Möglichkeit, einzelne Flächen mit Geschwindigkeitsvektoren zu belegen, wodurch auf diese Weise Transport- und Förderbänder simuliert werden können, ohne die einzelnen Glieder simulieren und modellieren zu müssen. Erste Versuche haben gezeigt, dass eine Simulation komplexer Fördereinrichtungen sonst nicht möglich wäre, da sie nicht auf einem handelsüblichen Computer in Echtzeit ausgeführt werden kann.

Eine gut dokumentierte Schnittstellenbeschreibung (SMITH 2006) und ein aktives Internetforum für Fragen zur Implementierung runden die positiven Eigenschaften der ODE ab.

### 6.2.5.3 Simulationsobjekte in Ve<sup>3</sup>

Die interne Struktur der Simulationsobjekte in Ve<sup>3</sup> sieht für jeden Knoten des Szenenraphen (VeNode) ein Visualisierungsobjekt (VeVisualObject) vor, das als Entkopplung von der Grafikbibliothek zu sehen ist. Die Geometrieknoten (VeNodeGeom) sind den jeweiligen Knoten im Szenenraphen zugeordnet und besitzen darüber hinaus ein Simulationsobjekt (VeSimulationObject) und ein Kollisionsobjekt (VeCollisionObject), welche ebenfalls als Entkopplung von den jeweiligen Bibliotheken (ODE und SOLID) dienen (siehe Abbildung 6-8).

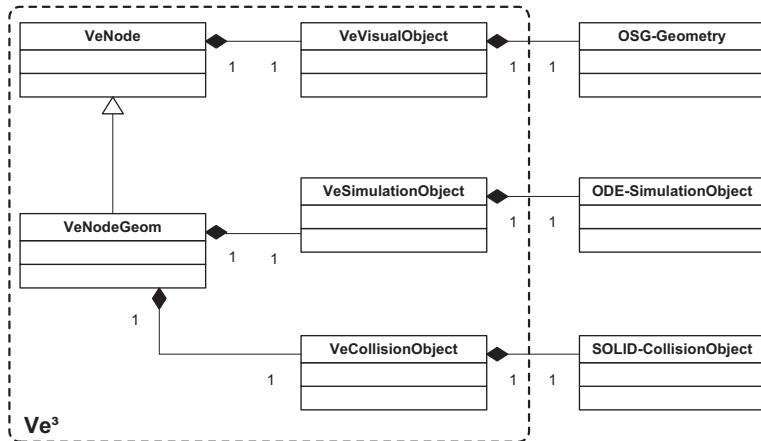


Abbildung 6-8: UML-Klassendiagramm für die Abbildung der Simulationsobjekte (vgl. EGERMEIER 2008)

### 6.2.6 Externe Kommunikation

Neben der internen Kommunikation in Ve<sup>3</sup> müssen über eine Schnittstelle auch Daten mit externen Programmen (z. B. WinMOD®) und Systemen (z. B. Trackingsystem) ausgetauscht werden. Mit einer UDP-Schnittstelle ist es in Ve<sup>3</sup> möglich, beliebig Daten aus anderen Anwendungen zu empfangen oder an sie zu senden. Hierzu kann in Ve<sup>3</sup> ein Datenobjekt definiert werden, in welchem die zu übermittelnden Werte abgelegt werden. Dieses Datenobjekt wird dann in festen Zeitabständen vom Modul *Remote Manager* verschickt bzw. empfangen.

### 6.3 Eingabe

In Abschnitt 3.4.2 sind die Grundformen der Eingabe (Navigation, Selektion, Manipulation und Applikationssteuerung) ausführlich beschrieben. Diese Interaktionsmöglichkeiten wurden auch in der Simulationsplattform Ve<sup>3</sup> prototypisch umgesetzt. Um für den Benutzer eine möglichst intuitive Interaktion gewährleisten zu können, die sowohl an einem Desktop-Arbeitsplatz als auch an einer Powerwall mit Trackingsystem zur Verfügung steht, wurde ein neues Eingabegerät konzipiert. Es handelt sich hierbei um ein trackbares, kabelloses Gamepad, das über Steuerkreuze und Funktionstasten verfügt und dessen Position durch einen Tracking Body von einem Trackingsystem erfasst werden kann (siehe Abbildung 6-9). Alternativ kann das Gamepad auch an einem Desktop-Arbeitsplatz genutzt werden, die Funktionalität der Steuerung durch die Positionserfassung muss in diesem Fall durch eine separate Belegung der Steuerkreuze abgedeckt werden.

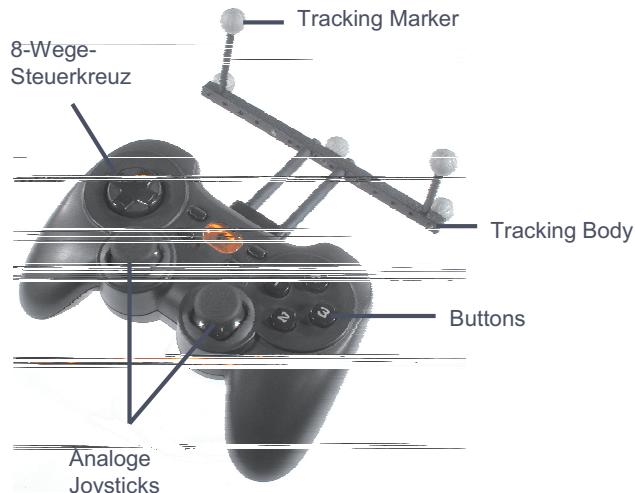


Abbildung 6-9: Trackbares Gamepad zur Interaktion

Das Eingabegerät zeichnet sich vor allem durch die vielseitigen Möglichkeiten der Eingabe (Steuerkreuze, Tasten und Tracking Body), durch geringe Anschaffungskosten (derzeit ca. 300 €) und eine einfache Integration in die Simulationsumgebung aus. Darüber hinaus werden von Ve<sup>3</sup> auch Standardeingabegeräte (z. B. Maus oder Tastatur) unterstützt, die aber aufgrund der beschränkten Ein-

gabemöglichkeiten bezüglich einer 3-D-Interaktion nur wenig intuitiv verwendet werden können.

Im Folgenden werden deshalb die Interaktionsmöglichkeiten in der Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup> am Beispiel des trackbaren Gamepads vorgestellt.

### 6.3.1 Navigation

In Ve<sup>3</sup> wurden für die Navigation durch die Simulationsszene die analogen Joysticks des getrackten Gamepads (siehe Abbildung 6-9) mit Funktionen belegt. Der linke Joystick wurde für die reine lineare Bewegung in vier Raumrichtungen (links, rechts, vor und zurück) eingesetzt, während mit dem rechten Joystick die virtuelle Kamera gedreht und gekippt werden kann (siehe Abbildung 6-10).



Abbildung 6-10: Belegung der analogen Joysticks für die Navigation durch die Simulationsszene

Diese Belegung bietet den Vorteil, dass sowohl am Arbeitsplatz als auch an einer Powerwall eine einfache Navigation durch die Simulationsszene möglich ist. Auf

diese Weise können während des Simulationsablaufs das virtuelle Modell der Produktionsanlage und die Ergebnisse der Simulation sehr genau aus allen Blickrichtungen betrachtet und analysiert werden.

### **6.3.2 Selektion**

Die Selektion wurde in Ve<sup>3</sup> mittels eines virtuellen Cursors, der durch die Simulationsszene gesteuert werden kann, umgesetzt. Der Cursor wird hierbei als Kollisionskörper simuliert, so dass bei Kollision mit einem Simulationsobjekt ein Signal ausgelöst und so die Selektion des Simulationsobjektes detektiert wird. Zusätzlich zur Bewegung mittels der analogen Joysticks wird auch ein optisches Trackingsystem unterstützt, das vor einer Powerwall eine intuitivere Eingabe ermöglicht. Durch die Erfassung des Gamepads (Position und Rotation) über das Trackingsystem kann der Cursor zur Selektion in allen sechs Freiheitsgraden im virtuellen Raum der Simulationsszene bewegt werden. So kann z. B. durch eine einfache Vorwärtsbewegung des getrackten Gamepads der virtuelle Cursor in der Simulationsszene entsprechend bewegt werden. Weil am Büroarbeitsplatz in der Regel kein Trackingsystem zur Verfügung steht, kann die Bewegung des Cursors durch einen Moduswechsel mit den analogen Joysticks, ähnlich wie bei der Navigation, ausgelöst werden. Dadurch ist der Einsatz desselben Eingabegerätes sowohl für den Büroarbeitsplatz als auch vor einer Powerwall geeignet. Darüber hinaus können durch die zweihändige Bedienung des Gamepads Bewegungen sehr schnell und intuitiv ausgeführt werden.

### **6.3.3 Manipulation**

Das Konzept der Simulationsumgebung mit Physikmodellen sieht eine Manipulation der Simulationsobjekte vor, bei der in einem ersten Schritt die Lage (Position und Rotation) verändert werden kann. Auf diese Weise kann direkt in einen Simulationsablauf eingegriffen werden und es können schnell verschiedene Testfälle nachgestellt werden.

Diese Manipulation kann nach einer erfolgreichen Selektion (Kollision zwischen Cursor und Simulationsobjekt) ausgeführt werden. Hierzu kann der Benutzer zusätzlich zu einer Selektion mit einem Knopfdruck das Simulationsobjekt greifen, welches dann, solange der Knopf gedrückt bleibt, zusammen mit dem Cursor bewegt wird.

### 6.3.4 Applikationssteuerung

Neben der Navigation, Selektion und Manipulation gehört auch die Steuerung der eigentlichen Applikation zu den Grundformen der Interaktion. In Ve<sup>3</sup> umfasst die Applikationssteuerung in der ersten Ausbaustufe folgende Funktionen:

- Zurücksetzen der Simulationsszene in die konfigurierte Ausgangssituation
- Aufzeichnen der Simulationsergebnisse in einem Film
- Beenden der Applikation

Diese Funktionen sind auf die restlichen Buttons des getrackten Gamepads verteilt, damit auch die Applikationssteuerung ohne einen Wechsel des Eingabegeätes auskommt.

## 6.4 Ausgabe

Die Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup> unterstützt für die Ausgabe der Ergebnisse an den Benutzer sowohl einen handelsüblichen Monitor als auch die am *iwb* im Rahmen des Virtual-Reality-Labors zur Verfügung stehende Einrichtung. Es handelt sich hierbei um eine Powerwall IC:One, die mit einem optischen Trackingsystem der Firma Advanced Realtime Tracking GmbH ausgestattet ist. Die Powerwall unterstützt die passive Stereoskopie, so dass der Benutzer mit einer leichten Brille mit Polarisationsfiltern die Simulationsszene mit einem 3-D-Eindruck wahrnehmen kann.

In Ve<sup>3</sup> wurde die Ausgabe durch entsprechende Adapterklassen auf Basis der Grafikbibliothek OpenSceneGraph realisiert.

## 6.5 Realisierung des Hardwareaufbaus

In diesem Abschnitt wird der verwendete Hardwareaufbau (siehe Abbildung 6-11) in der maximalen Konfiguration näher beschrieben, d. h. einige der Systemkomponenten sind optional (z. B. Powerwall, wenn an einem Büroarbeitsplatz simuliert und auf Stereoskopie verzichtet werden soll).

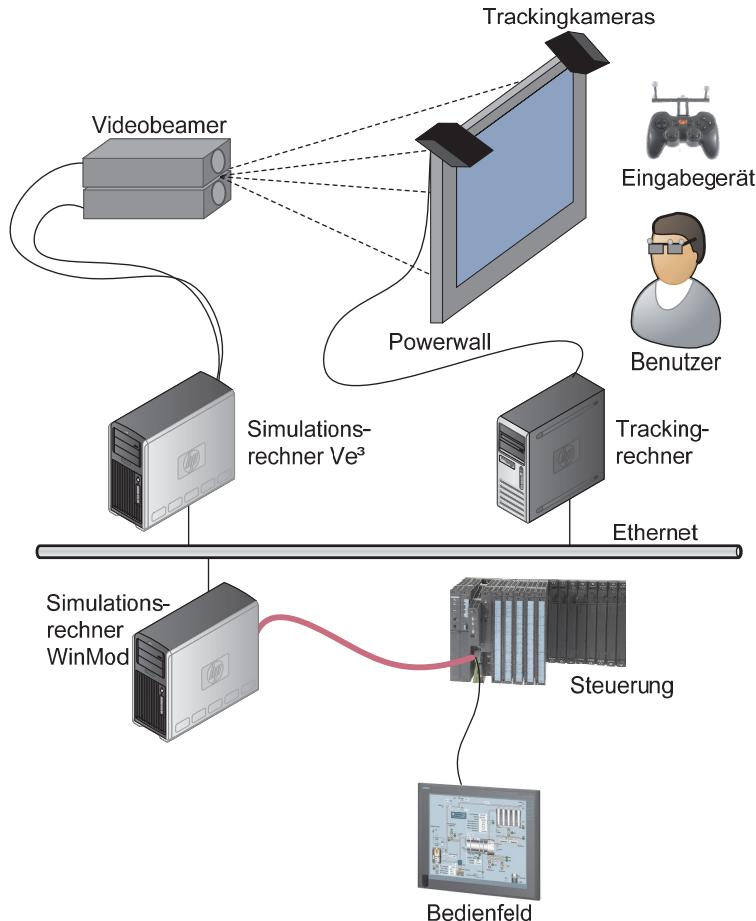


Abbildung 6-11: Struktur des Teststandes

- Bedienfeld (optional)

Fast alle Produktionsanlagen sind mit einem Bedienfeld in Form eines Touch-Screens ausgestattet, mit dem der aktuelle Zustand visualisiert wird und der Nutzer den steuerungstechnischen Produktionsablauf anpassen kann. Auch Fehlerzustände werden an diesem Bildschirm angezeigt. Dieses Bedienfeld kann auch in die Simulation integriert werden. Es wird hierzu wie an der realen Produktionsanlage an die Steuerung angeschlossen. Auch während der Simulation ist der

Einsatz eines Bedienfeldes möglich und sinnvoll, da so zusätzlich zur Steuerungssoftware die Bediensoftware getestet werden kann.

- Steuerung S7-400

Die Steuerung der Produktionsanlage (z. B. S7-400 der Firma Siemens AG) kontrolliert zyklusbasiert die einzelnen Komponenten der Produktionsanlage (z. B. hydraulische Zylinder). Im Simulationsaufbau ist die Steuerung über einen Datenbus (z. B. Profibus) mit dem Simulationsrechner für das Verhaltensmodell der Produktionsanlage verbunden.

- Simulationsrechner WinMOD®

Dieser Simulationsrechner empfängt über den Profibus, der an die Einstektkarte SIMBAPro PCI angeschlossen ist, die ausgehenden Signale der Steuerung. Diese wiederum sind in der Simulationssoftware WinMod® 5, welche das funktionale Verhaltensmodell der Produktionsanlage abbildet, als Eingänge verknüpft. Die Antworten aus der Simulation werden ebenfalls als Signale an die Steuerung zurückübertragen, so dass zwischen der Steuerung und dem Simulationsrechner ein Funktionstest der einzelnen Systemkomponenten möglich ist. Zusätzlich gibt der Simulationsrechner die Zustände der Aktorik über das Netzwerk (Ethernet) an den Simulationsrechner Ve<sup>3</sup> weiter und empfängt von dort die Signale der simulierten Sensoren.

- Simulationsrechner Ve<sup>3</sup>

Auf diesem Rechner (Intel Xeon 3,4-GHz-Prozessor, 2 GB Arbeitsspeicher, NVidia Quadro FX 3400/4400-Grafikkarte) läuft die beschriebene Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup>, welche die Simulation des Materialflusses und der Sensorik unter Verwendung eines Physikmodells ausführt. Hierzu empfängt der Rechner über das Netzwerk die aktuellen Zustände der Aktorik und verschickt Signale, die von der simulierten Sensorik ausgelöst werden. Darüber hinaus visualisiert der Rechner dem Benutzer die Ergebnisse aus der Simulation in Form eines 3-D-Modells an einem Monitor oder stereoskopisch an einer Powerwall. Für die Berechnung der Interaktion werden vom Trackingrechner zusätzlich aktuelle Positions- und Orientierungsdaten der getrackten Eingabegeräte entgegengenommen.

- Powerwall (optional)

Die Powerwall IC:One der Firma ic:ido ist ein Rückprojektionssystem mit einer Visualisierungsfläche von 2,00 m x 1,50 m. Zwei Beamer des Typs Christie LX33 mit 3300 Ansilumen, die an die Grafikkarte des Simulationsrechners Ve<sup>3</sup> angeschlossen sind, projizieren hierzu das Bild von hinten an eine halbtrans-

parente Glasscheibe. Vor den Beamerlinsen sind unterschiedliche Polarisationsfilter angebracht, damit der Benutzer die Bilder mit der Polarisationsbrille für beide Augen separieren und die Simulationsszene stereoskopisch aufnehmen kann.

- Trackingsystem (optional)

Das Trackingsystem der Firma A.R.T. berechnet mit der Software DTrack die Positionen und Orientierungen der verschiedenen Trackingbodies. Mit den Trackingkameras (ARTtrack1 von A.R.T.) können mehrere Trackingbodies (z. B. Eingabegerät und Polarisationsbrille) gleichzeitig erfasst werden. Diese Informationen werden bis zu 60 Mal pro Sekunde über das Netzwerk an den Simulationsrechner Ve<sup>3</sup> übertragen.

- Getrackte Polarisationsbrille (optional)

Mit der Polarisationsbrille, die für jedes Auge mit orthogonal zueinander ausgerichteten Polarisationsfiltern ausgestattet ist, kann der Benutzer das von den Videobeamern erzeugte Bild stereoskopisch aufnehmen und so einen 3-D-Eindruck wahrnehmen. Durch den auf der Brille angebrachten Trackingbody wird die Kopfposition des Benutzers erfasst (Headtracking). Auf Basis dieser Position und Orientierung kann das Bild dann der Blickperspektive angepasst und optimiert werden.

- Getracktes Eingabegerät

Das bereits in Abschnitt 6.3 beschriebene Eingabegerät basiert auf dem Logitech® Rumblepad II Cordless. Um die Position und Orientierung im Raum feststellen zu können, ist es mit einem Trackingbody der Firma A.R.T. versehen. Das Eingabegerät kann ebenfalls an einem Büroarbeitsplatz eingesetzt werden, jedoch ist das Tracking in diesem Fall deaktiviert.

## **6.6 Exemplarische Anwendung**

### **6.6.1 Allgemeines**

In diesem und in den folgenden Abschnitten wird die Anwendung des beschriebenen Konzeptes und der Einsatz der Simulationsumgebung detailliert wiedergegeben. Als Beispiel dient eine fiktive Sortierstation, die aus vier im Uhrzeigersinn angeordneten Förderbändern besteht, um in der Simulation einen fortlaufenden Materialfluss ohne Quellen und Senken demonstrieren zu können

(siehe Abbildung 6-12). Der Sortievorgang wird von einem pneumatischen Zylinder, der nach einem Signal der verbauten Lichtschranken ausgelöst wird, durchgeführt. Die Lichtschranken sind übereinander angeordnet, so dass erkannt werden kann, ob die Gegenstände auf dem Förderband einfache oder doppelte Höhe haben. Je nach Programmwahl können so entweder hohe oder niedrige Teile in einen dafür vorgesehenen Behälter aussortiert werden. Die Rutsche zum Behältnis soll die mögliche Simulation eines nicht definierten Materialflusses verdeutlichen, bei welchem die Gegenstände in beliebiger Position und Orientierung transportiert werden können. An den Übergängen zwischen den einzelnen Förderbändern sind Leitbleche angebracht, die das Herunterfallen des Transportgutes verhindern.

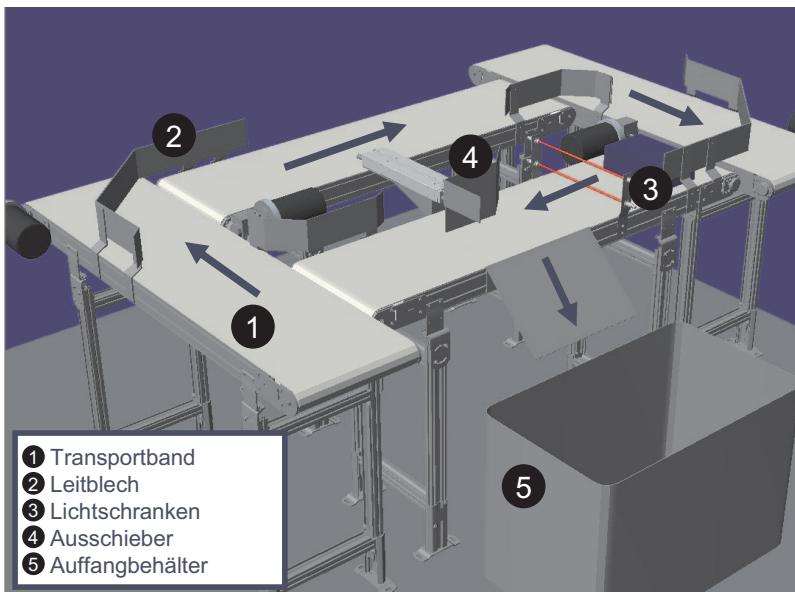


Abbildung 6-12: Beispielhafte Sortierstation mit vier Transportbändern, zwei Lichtschranken, einem Ausschieber und einem Auffangbehälter

Im Folgenden wird der im Rahmen der Konzeptbeschreibung vorgeschlagene Modellerstellungsprozess anhand eines konkreten Beispiels erläutert.

### **6.6.2 Erstellung des Visualisierungsmodells**

Beim Aufbau des CAD-Modells wurde auf Bauteile der Hersteller Dorner® Mfg. Corporation, Festo AG und SICK AG zurückgegriffen, deren Modelle online für die CAD-Entwicklung verfügbar sind.

Analog dem Vorgehen zur Erstellung eines Visualisierungsmodells (siehe Abschnitt 5.2.1) wurde nach Abschluss der CAD-Konstruktion ein Geometriemodell der fiktiven Sortierstation aus dem CAD-System (CATIA V5) in Form eines triangulierten Flächenmodells exportiert. Um das Modell in Echtzeit mit dem Simulationsrechner Ve<sup>3</sup> simulieren und visualisieren zu können, war eine Simplifizierung des Modells notwendig. Hierzu wurde auf das Tool VizUp™ zurückgegriffen, das eine schrittweise prozentuale Reduktion der Anzahl der Dreiecke, die das polygonale Oberflächennetz der geometrischen Körper bilden, erlaubt. Abbildung 6-13 zeigt eine Aufstellung des Simplifizierungsvorgangs des Visualisierungsmodells. Selbst eine Reduktion um 75 % lässt optisch keine Fehler (z. B. nicht geschlossene Körper) erkennen. Erst bei einer Reduktion um 90 % und mehr werden Fehler im Geometriemodell ersichtlich. Fehler im Modell führen bei der Simulation zu Berechnungsfehlern bei Kollisionen von Objekten, so dass eine korrekte Simulation unter Verwendung von Physikmodellen in Frage gestellt ist.

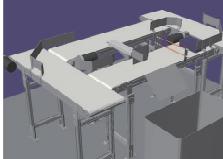
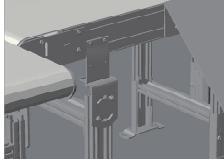
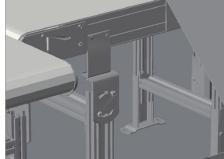
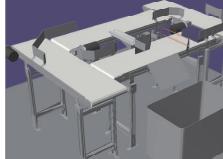
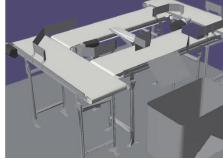
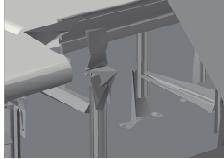
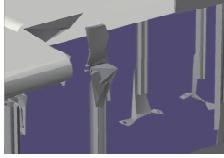
Reduktion/ Polygone	Ansicht Gesamtanlage	Ansicht Teilausschnitt
0 % 215.677		
50 % 107.838		
75 % 53.919		
90 % 21.566		
94 % 12.940		
95 % 10.783		

Abbildung 6-13: Simplifizierung des triangulierten Modells der Produktionsanlage

### 6.6.3 Erstellung des Physik- und Kinematikmodells

Die Erstellung des Physikmodells erfolgt auf Basis des triangulierten Geometriemodells, das für die Starrkörpersimulation mit weiteren Informationen (z. B. Masse) angereichert werden muss. Diese Daten werden mit der XML beschrieben (siehe Abbildung 6-14), so dass von der Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup> die erforderlichen Parameter, die zur entsprechenden Konfiguration der Physiksimulation notwendig sind, in einem definierten Schema eingelesen und verarbeitet werden können.

```
<body>
  <name>Ausschieber01</name>
  <attach>zusammenbau.Ausschieber01</attach>
  <objectType>rigidBody</objectType>
  <type>
    <box>
      <mass>1</mass>
    </box>
  </type>
  <surface>
    <mode>
      <dContactApprox1_1/>
    </mode>
    <mu>0</mu>
  </surface>
</body>
```

*Abbildung 6-14: XML-Beschreibung der für die Physiksimulation notwendigen Parameter des Ausschiebers*

Neben den beschriebenen Eigenschaften eines Simulationsmodells ist für die Simulation einer Produktionsanlage vor allem auch das Bewegungsverhalten (Kinematik) von Bedeutung. Um ein entsprechendes Verhalten (z. B. Verfahrweg eines Zylinders) abbilden zu können, wird es mit der Nutzung von Gelenken (Joints) im Physikmodell festgelegt. Abbildung 6-15 zeigt die Definition des Bewegungsverhaltens eines pneumatischen Zylinders (Ausschieber) für die Einbindung in die Physiksimulation. Für den Zylinder wird ein Linear-Motor-Gelenk definiert, das z. B. neben weiteren Eigenschaften die Bewegungsrichtung (axis) vorgibt.

```
<joint>
  <name>LinearMotor01</name>
  <ref1>Ausschieber01</ref1>
  <ref2>!0</ref2>
  <type>
    <jointMotorLinear>
      <axis>1.0 0.0 0.0</axis>
      <maxForce>10.0</maxForce>
      <min>-1.4</min>
      <max>0.2</max>
    </jointMotorLinear>
  </type>
</joint>
```

*Abbildung 6-15: XML-Beschreibung der Kinematik des Ausschiebers für die Physiksimulation*

#### 6.6.4 Integration der Sensoren

In Abschnitt 5.2.3 wurde gezeigt, wie Sensoren in das Physikmodell einer Produktionsanlage integriert werden können. Der Erfassungsbereich der Sensoren des Anwendungsbeispiels wurde zunächst als geometrischer Körper nachmodelliert und mit der XML-Schnittstelle in das Physikmodell als Kollisionskörper aufgenommen (siehe Abbildung 6-16).

```
<body>
    <name>Sensor02</name>
    <attach>zusammenbau.Sensor02</attach>
    <objectType>sensor</objectType>
    <type>
        <box>
            <mass>0</mass>
        </box>
    </type>
    <surface>
        <mode>
            <dContactApprox1_1/>
        </mode>
        <mu>0.9</mu>
    </surface>
</body>
```

*Abbildung 6-16: Physikalische XML-Beschreibung eines Sensors*

Um eine Übertragung der Werte der Sensorik ohne eine Anpassung des Quellcodes realisieren zu können, wird für jeden Sensor ein Remote-Objekt konfiguriert (siehe Abbildung 6-17). Die einzelnen Remote-Objekte werden dann beim Start der Simulationssoftware Ve<sup>3</sup> eingelesen und in die Kommunikation aufgenommen.

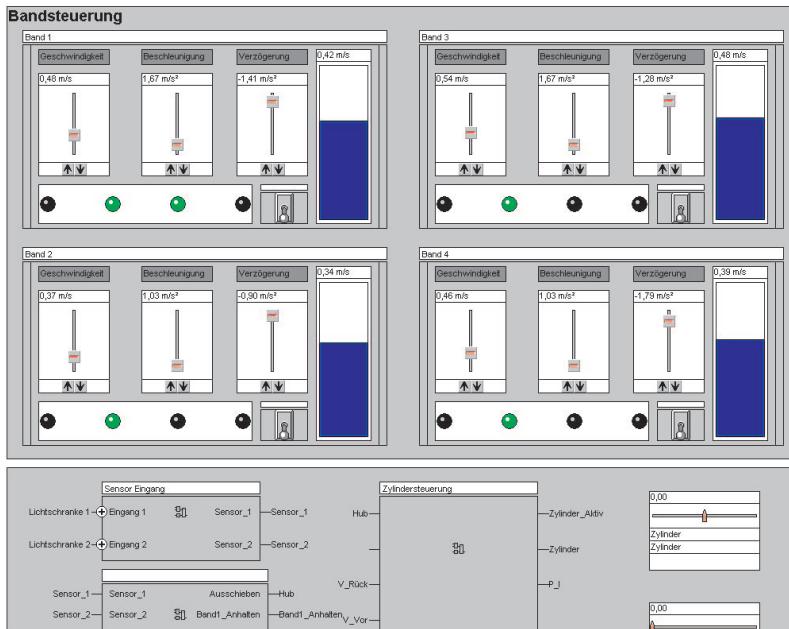
```
<remoteObject>
    <name>Sensor02</name>
    <type>
        <SENSOR_ACTIVITY/>
    </type>
</remoteObject>
```

*Abbildung 6-17: XML-Beschreibung des Remote-Objektes eines Sensors*

## **6.6.5 Beschreibung des Verhaltensmodells und der Kommunikation mit dem Simulationsrechner Ve<sup>3</sup>**

Das entsprechende Verhaltensmodell der Produktionsanlage wurde mit der Software WinMOD® erstellt. Mit dieser Software kann ein Test des Steuerungscodes

durch eine Kopplung der SPS über einen Datenbus (z. B. Profibus) durchgeführt werden. Zur Bedienung kann in WinMOD® eine Oberfläche für die einzelnen steuerbaren Komponenten erstellt werden, mit welcher die Parameter der Komponenten manuell verändert werden können (siehe Abbildung 6-18). Dieser Vorgang wird auch „Forcen“ genannt. Auf diese Weise kann auch ohne Anschluss einer Steuerung das Physikmodell mit Kinematik und Sensorik getestet werden.



*Abbildung 6-18: Bedienoberfläche des Verhaltensmodells in der Simulationssoftware WinMOD®*

Um das Physikmodell und die Verhaltenssimulation miteinander verbinden bzw. die Werte der verschiedenen Komponenten (Aktorik und Sensorik) austauschen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit das sogenannte Run-Modul entwickelt. Es übernimmt die Kommunikation zwischen WinMOD® und dem Simulationsrechner Ve<sup>3</sup> mittels UDP und wird auf dem WinMOD®-Simulationsrechner ausgeführt. Des Weiteren hält es einige Visualisierungs- und Force-Funktionen bereit, die einen Test der Funktionsweise des Physikmodells ermöglichen, ehe das Verhaltensmodell fertiggestellt ist. Das Run-Modul übernimmt keine Daten-

konvertierung, -validierung oder -manipulation. Die Kommunikation mit WinMOD® erfolgt über einen Shared-Memory-Zugriff und über Windows-Events.

WinMOD® als Steuerungssimulation ist zyklisch aufgebaut und schreibt die Daten in jedem Zyklus in das Speicherabbild. Nach jedem Schreiben wird ein Windows-Event ausgelöst, welches vom Run-Modul abgefangen wird. Um den Datenstrom so gering wie möglich zu halten, vergleicht das Run-Modul, ob sich Daten geändert haben, die als OUT-Daten gekennzeichnet sind, und sendet nur, wenn sich diese geändert haben.

Da das Run-Modul keine Informationen über die im Speicherabbild enthaltenen Variablen und deren Typen und die damit verbundenen Längen enthält, müssen die Segmente des Speicherabbildes mit Startadresse und Länge in einer Konfigurationsdatei gespeichert werden. Außerdem muss neben einer Benennung zur besseren Verwendung auch der Typ der Variable (IN/OUT) festgelegt werden.

Die Verbindung zwischen dem Run-Modul und dem Simulationsrechner Ve<sup>3</sup> basiert auf dem UDP-Protokoll mit einheitlich definierten Paketen ohne Handschake. Das Run-Modul schreibt alle relevanten Daten (OUT) in ein Byte-Array und sendet das Feld. Die Simulationssoftware Ve<sup>3</sup> interpretiert das Paket unter Verwendung der für jedes Projekt individuellen Konfigurationsdatei.

Ebenso kann die Simulationssoftware Ve<sup>3</sup> auch Daten an das Run-Modul schicken, die es dann in den mit WinMOD® gemeinsamen Speicherbereich schreibt. Beim nächsten Zyklus werden die Daten dann von WinMOD® weiterverarbeitet.

### **6.6.6 Simulation**

Nach der Modellerstellung folgten einige Tests, um die Funktionsfähigkeit des Modells sicherstellen zu können. Im Anschluss konnten erste Abläufe durch Positionieren einzelner Werkstücke auf den Fördereinrichtungen und anschließenden Start des Simulationsmodells sowie der Steuerung simuliert werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Werkstücke durch Bewegung der Förderbänder transportiert und durch die angebrachten Leitbleche auf das jeweils nächste Förderband weitergereicht werden. Bei der Berechnung der Reibung zwischen den Oberflächen der Werkstücke und der Förderbänder, die für einen korrekten Transport der Werkstücke Grundvoraussetzung ist, wurden die Gesetze von Coulomb angewandt. Die Sensoren wurden durch die Kollision der Werkstücke mit den Sensorbereichen ausgelöst und die Events an die Verhal-

tenssimulation WinMOD® gesendet, woraufhin entsprechende Aktionen (z. B. „Abschieben der Werkstücke“) von der Steuerung ausgeführt werden konnten.

Im Folgenden werden einige Simulationsvorgänge näher beschrieben, um die Möglichkeiten der Simulation mit Physikmodellen anschaulich zu verdeutlichen.

### **Beispiel 1: Materialflussstau und Umschichten von Teilen zwischen zwei Förderbändern durch Leitbleche**

Anhand dieses Beispiels kann in der Simulation überprüft werden, ob für das Weiterleiten der Transportteile von einem Förderband zum nächsten, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind, Leitbleche erforderlich sind, damit die Teile nicht herunterfallen und somit als fehlerhafte Teile aus der Produktion genommen werden müssen (siehe Abbildung 6-19). Der Materialfluss ist in diesem Beispiel von links oben nach rechts unten in der Szene orientiert. Es werden drei Pakete unterschiedlicher Höhe in sehr kurzem Abstand über die Förderbänder transportiert, weshalb durch das im 45°-Winkel zum Förderband angeordnete Leitblech beim Abschieben auf das untere Förderband die Teile sich kurzfristig etwas aufstauen (siehe Teilbilder 1-3). Sobald ein Paket auf das folgende Förderband umgelagert und davon mitgeführt wird, wird der Abstand zwischen den Paketen aufgrund der fehlenden Reibung am Leitblech wieder größer. In den Teilbildern 4-12 ist zu erkennen, dass das Leitblech lang genug gewählt wurde und keine Pakete die Förderbänder unkontrolliert verlassen. Neben der Länge der Leitbleche können auch deren Anbringung und deren Form sowie Materialien mit unterschiedlichen Reibungswerten getestet werden, damit die Teile auf dem nächsten Förderband wieder mit der gewünschten Orientierung weiter transportiert werden können. Die möglichen Geschwindigkeitseinstellungen der Förderbänder können ebenfalls kontrolliert werden, damit es nicht zu einem Materialflussstau kommt bzw. um das Verhalten der Produktionsanlage in diesem Fehlerfall erproben zu können.

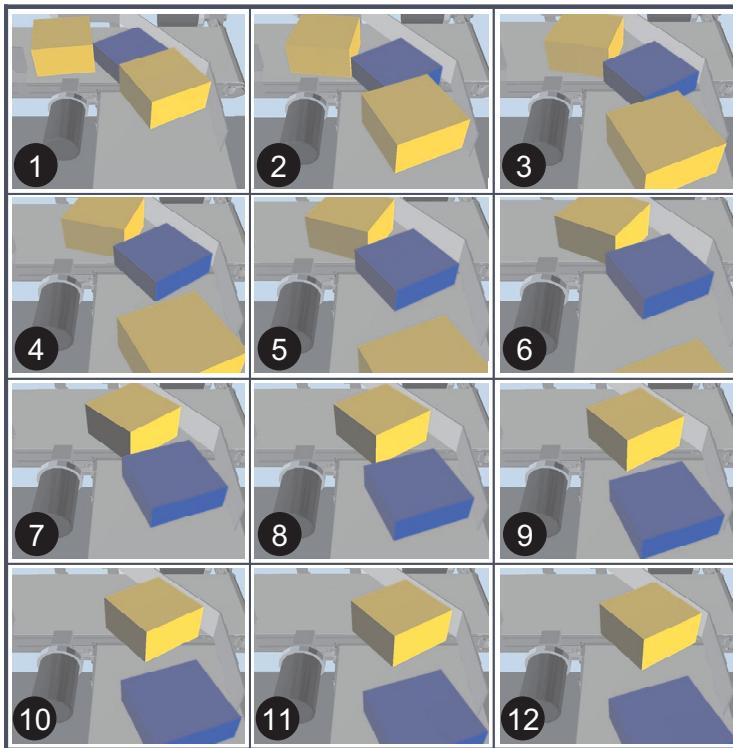
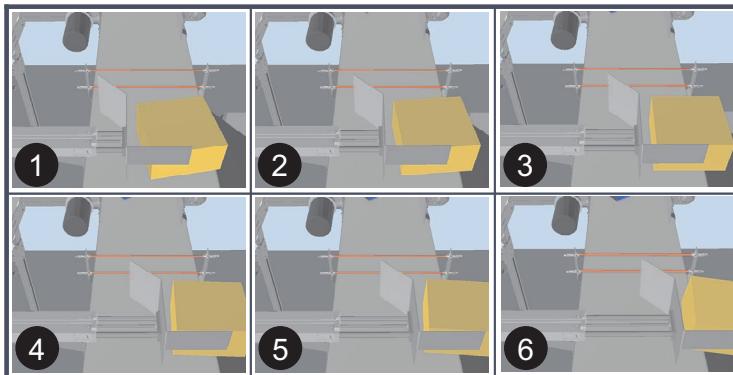


Abbildung 6-19: Bilderserie eines Teilausschnitts der Simulation – Materialflusstau und Umschichten zwischen zwei Förderbändern durch Leitbleche

### Beispiel 2: Aussortieren von Teilen

In diesem Beispiel wird der eigentliche Sortievorgang der beispielhaften Sortierstation gezeigt. Das Transportgut wird auf dem Förderband von oben nach unten bewegt (siehe Abbildung 6-20). Hierbei ist eine doppelte Lichtschranke als Sensor angebracht. Dieser kann so programmiert werden, dass er bei der Auslösung bei einer der beiden Lichtschranken den Ausschiebevorgang startet (siehe Teilbilder 1-6 der Abbildung 6-20). So können entweder hohe oder niedrige Transportteile aussortiert werden. Der Abschieber führt dabei durch seine Bewegung entweder hohe oder niedrige Transportteile vom Förderband zu einer Rutsche, über welche die Teile in einen dafür vorgesehenen Auffangbehälter fallen (siehe

auch Übersicht in Abbildung 6-12). Mit diesem Beispiel kann getestet werden, ob die zeitliche Abstimmung zwischen Sensor (Lichtschranke) und Aktor (Ausschieber) richtig ist oder ob die Position des Sensors angepasst bzw. eine zeitliche Verzögerung programmiert werden muss. Auch die Form und die Länge des Verfahrwegs des Ausschiebers können so abgestimmt werden.



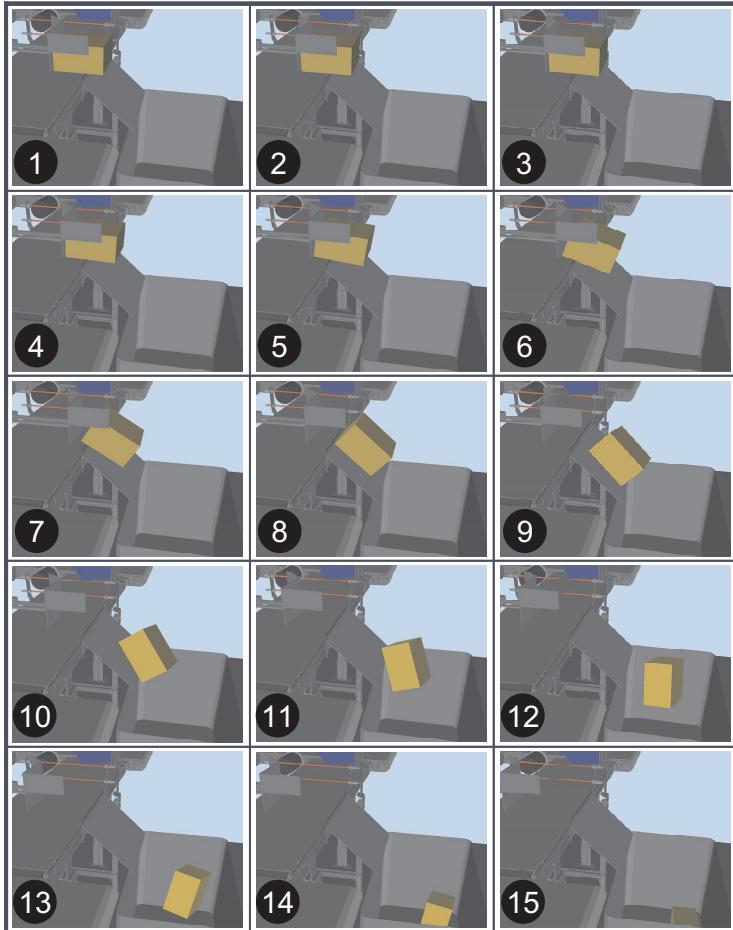
*Abbildung 6-20: Bilderserie eines Teilausschnitts der Simulation – Abschieben eines Teils*

### **Beispiel 3: Transport von Teilen über eine schräge Rutsche**

Das Problem der Simulation eines undefinierten Materialflusses, der vor allem bei Fördereinrichtungen ohne Antrieb auftritt, konnte bislang nur durch logische Verkettung gelöst werden. Anhand dieses Beispiels kann gezeigt werden, dass bei der Simulation mit Physikmodellen undefinierter Materialfluss allein durch Festlegung der physikalischen Eigenschaften abgebildet werden kann. Das Beispiel zeigt den Transport der Teile nach dem Abschiebevorgang über eine Rutsche in einen dafür vorgesehenen Auffangbehälter (siehe Abbildung 6-21). Der Materialfluss ist in der Abbildung von links oben nach rechts unten angeordnet. Während in den Teilbildern 1-6 nochmals der Abschiebevorgang gezeigt wird, ist in den Teilbildern 7-11 die Simulation des undefinierten Materialflusses auf der Rutsche und in den Teilbildern 12-15 das freie Fallen der Transportteile in den Auffangbehälter zu erkennen.

Anhand dieses Beispiels kann gezeigt werden, dass bei der Simulation mit Physikmodellen Aussagen über die Position und die nötige Größe des Auffangbe-

hältnisses getroffen werden können. Auch die Ausmaße der Rutsche und die Neigung können simulativ getestet werden.



*Abbildung 6-21: Bilderserie eines Teilausschnitts der Simulation – Transport von Teilen über eine schräge Rutsche*

### 6.6.7 Ergebnisse

Durch die Umsetzung in Ve<sup>3</sup> und das beschriebene Anwendungsbeispiel konnte die generelle Machbarkeit der Simulation einer Produktionsanlage mit Physikmodellen bewiesen werden. Darüber hinaus konnten die Potenziale, die in der Simulation mit Physikmodellen liegen, hervorgehoben werden.

Rückblickend auf das Anwendungsbeispiel konnte verdeutlicht werden, dass der Aufwand für die Erstellung eines Physikmodells im Vergleich zur Verwendung eines herkömmlichen logikbasierten Materialflussmodells wesentlich reduziert werden konnte. Gerade bei nachträglichen Änderungen, die in der Praxis laufend auftreten, kann das Physikmodell innerhalb weniger Minuten angepasst werden. Diese Korrekturen dauern bisher bei logischen Modellen je nach Art der Änderung mehrere Stunden.

Die beschriebene Simplifizierung des Visualisierungsmodells, das auch als Basis für das Physikmodell dient, ist empfehlenswert, um auch größere Produktionsanlagen auf einzelnen Rechnern simulieren zu können. Der Prozess der Simplifizierung bringt eine wesentliche Komplexitätsreduzierung, ohne die Genauigkeiten des Modells wahrnehmbar einzuschränken. Der Vorgang an sich dauert durch die Unterstützung auf der Basis von Softwarewerkzeugen wenige Minuten.

Die Konfigurationsvorgänge sind derzeit von Hand mittels der BeschreibungsSprache XML zu erledigen, so dass Expertenwissen erforderlich ist. Der Einsatz von Konfiguratoren könnte die Zeit für die Modellkonfiguration weiter reduzieren, weshalb hier weiteres Einsparpotenzial besteht.

Insgesamt zeigt das Anwendungsbeispiel, dass durch den Einsatz von Physikmodellen der visuelle Eindruck wesentlich realitätsnäher ist und zugleich der Aufwand für die Modellerstellung im Vergleich zum herkömmlichen Ansatz wesentlich reduziert werden kann. Im folgenden Kapitel werden die Nutzenpotenziale näher beschrieben und anschließend der Ansatz der Simulation mit Physikmodellen bewertet.



## 7 Nutzenpotenziale und Bewertung

### 7.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Nutzenpotenziale des Einsatzes von Physikmodellen zur Simulation von Produktionsanlagen beschrieben. Im Anschluss daran wird das Verfahren technologisch und wirtschaftlich bewertet.

### 7.2 Nutzenpotenziale

#### 7.2.1 Vertrieb und Projektierung

Der Einsatz von Simulation bereits während des Vertriebes und in der Projektierung erhöht die Chancen, Kunden für sich zu gewinnen, weil schon sehr früh wichtige Aussagen bezüglich der Auslegung einer Produktionsanlage getroffen werden können. Die realistischen Effekte der Simulation können auf Kunden überzeugend wirken, da diesen viele der simulierbaren Effekte aus der Praxis gut bekannt sind (z. B. Kippen von Transportgut). Derzeit wird im Vertrieb und in der Projektierung Simulation nur sehr eingeschränkt eingesetzt, weil der Aufwand für die Modellerstellung bislang als zu hoch angesehen wird. Hier bietet der Ansatz der Simulation mit Physikmodellen durch das Ableiten der Modelle aus dem CAD eine Aufwandsreduzierung und ermöglicht somit den Einsatz der Simulation bereits in der Vertriebs- und Projektierungsphase einer Produktionsanlage.

#### 7.2.2 Entwicklung und Inbetriebnahme

Die aufwendige Modellerstellung für eine virtuelle Inbetriebnahme hat bisher eine entwicklungsbegleitende Simulation der Steuerungsprogramme unwirtschaftlich erscheinen lassen, so dass aus Kostengründen allenfalls eine virtuelle Inbetriebnahme am Ende des Entwicklungsprozesses durchführbar war. Durch die schnelle und teilautomatisierte Modellerstellung beim Ansatz mit Physikmodellen kann zukünftig bereits während der Entwicklung des Steuerungscodes ein entsprechendes Simulationsmodell der Produktionsanlage zur Verfügung gestellt werden. Dies wird auch den Entwicklungsprozess wesentlich vereinfachen, da, wie bei der Softwareentwicklung in Programmierhochsprachen, ein Test des Steuerungsprogramms oder von Teilen davon während der Entwicklung möglich

ist. Die nachgelagerte virtuelle Inbetriebnahme einer Produktionsanlage könnte dann vom Aufwand her reduziert oder sogar ganz eingespart werden, was eine Verkürzung des Entwicklungsprozesses zur Folge hätte. Auch der Einsatz des beschriebenen Simulationsansatzes für eine spätere Weiterentwicklung der Steuerungsssoftware, um die Produktionsanlage nach der Inbetriebnahme zu optimieren, lässt großes Potenzial vermuten, da so zeitgleich produziert und entwickelt werden kann.

### **7.2.3 Produktion**

Die Simulation einer Produktionsanlage auf Basis eines Modells, das sich exakt wie die reale Produktionsanlage verhält, könnte die Steuerung derartiger Anlagen revolutionieren. Damit könnten eventuell auftretende Fehlerzustände im Programmablauf vorausschauend im laufenden Betrieb erkannt und vermieden werden. Ein realitätsgetreues Simulationsmodell ist aber auch mit dem Ansatz der Physiksimulation in den kommenden Jahren noch nicht realisierbar. Diese Aufgabenstellung gilt es in weiteren Forschungsarbeiten genauer zu untersuchen, auch wenn die vorgestellten Ergebnisse in dieser Arbeit ein wichtiger Schritt dorthin sein können.

### **7.2.4 Schulung**

An einer physikbasierten Simulationsumgebung können Beispiele für die Schulung nachgestellt werden, die bislang nur an einer realen Maschine simuliert werden konnten. So kann Bedienpersonal von Anlagen am Monitor mit einem Bedienpanel der Maschine geschult werden, d. h. es müssen beim Hersteller von Produktionsanlagen keine teuren Schulungsanlagen vorgehalten werden. Bislang wird häufig auf der Produktionsanlage vor Ort beim Kunden geschult, was aber den Produktionsprozess einschränkt bzw. unterbricht. Oft entspricht die Schulungsanlage nur in etwa der Anlage beim Kunden, weil selten dazu identische Produktionsanlagen ausgeliefert werden. Mit dem Einsatz der Physikmodelle können schnell Simulationsmodelle von ausgelieferten Produktionsanlagen erstellt werden, wodurch die Schulung an einem mit der beim Kunden stehenden Anlage identischen Simulationsmodell durchgeführt werden kann. Dies birgt vor allem für mittelständische Maschinen- und Anlagenbauer großes Potenzial, die bislang keine Schulungszentren vorhalten können und so dem Wettbewerb im Bereich der Schulung unterlegen sind. Typische Aussagen bei Schulungen wie

„Dies ist bei Ihrer Produktionsanlage ein kleines bisschen anders“ könnten somit bald der Vergangenheit angehören.

## 7.3 Technologische Bewertung

Gegenüber den bisher bekannten Ansätzen zur Materialflusssimulation, die sich auch für eine virtuelle Inbetriebnahme bzw. als Testmodell für die Entwicklung von Steuerungsprogrammen eignen, zeichnet sich das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren in einigen wesentlichen Punkten aus.

Der Einsatz von Physikmodellen ermöglicht eine Materialflusssimulation, die nicht auf logischen Verkettungen, sondern auf physikalischen Gesetzen basiert. Dies erhöht die Aussagekraft bei der Simulation deutlich, weil die abgebildeten Simulationsobjekte realitätsnahes Verhalten zeigen. Durch diesen Effekt können Szenarien simuliert und getestet werden, die bislang nur an der realen Produktionsanlage nachgestellt werden konnten. Im Folgenden sind einige Beispiele hierfür aufgelistet:

- Simulation von undefiniertem Materialfluss (z. B. auf nicht angetriebenen Fördereinrichtungen wie Rutschen)
- Stau im Materialfluss (z. B. durch Verklemmen der Teile bei einer zu kleinen Öffnung)
- Das Herunterfallen von Teilen, die an Übergängen von verschiedenen Fördermitteln nicht ordnungsgemäß weitergeleitet werden
- Das Kippen von Teilen auf Förderbändern, wenn die Bewegungsausführung zu ruckartig erfolgt oder die Lage der Teile auf den Förderbändern ein leichtes Kippen ermöglicht
- Zufällige Verteilung von Transportgut bei Schikanen im Materialfluss (z. B. Transport von Flaschen in einer Abfüllanlage)

Neben der Steigerung der Aussagekraft kann beim Verfahren mit Physikmodellen die Modellerstellung wesentlich verkürzt und in weiten Teilen automatisiert werden. Durch die direkte Übernahme der Modelle aus dem CAD werden Fehler bei der Modellerstellung weitgehend vermieden. Es lassen sich dadurch Modelle, die vorher in mehreren Tagen entwickelt werden mussten, in wenigen Minuten oder Stunden generieren und konfigurieren.

Neben den beschriebenen Vorteilen gibt es auch Einschränkungen, die an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben dürfen.

Mit Physikmodellen kann eine Produktionsanlage zwar realitätsnäher als bisher simuliert werden, ein vollständiger Abgleich mit der Realität ist derzeit jedoch noch nicht möglich, da die verwendeten Algorithmen den physikalischen Gesetzen zwar nahekommen, jedoch an einigen Stellen vereinfacht sind und damit ungenau werden. Aber auch wenn ein direkter Abgleich mit der Realität nicht zu vollkommen übereinstimmenden Ergebnissen führt, kann dieser Ansatz sehr wohl für die Entwicklung und Inbetriebnahme der Steuerungssoftware verwendet werden, da die Ergebnisse in der Regel genau genug sind, um den Ablauf der Produktionsanlage testen zu können.

Derzeit sind nicht alle Produktionsanlagen mit Physikmodellen abbildbar bzw. mit herkömmlichen Computern berechenbar. Vor allem die Menge der beweglichen Teile (z. B. Werkstücke) und deren geometrische Komplexität (Anzahl der Polygone) können schnell die Auslastung des Simulationsrechners herbeiführen, weshalb entweder die Rechenkapazität erhöht oder die Komplexität des Geometriemodells reduziert werden muss. Eine weitere Einschränkung ist die Taktzeit der Steuerung der Produktionsanlage. Momentan verfügbare Physiksimulationen sind auf eine Wiederholrate von maximal 60 Hz ausgelegt, so dass derzeit eine Taktzeit von ca. 20 ms auf Steuerungsseite simuliert werden kann. Der schnelle Zuwachs an Rechenkapazität und die Weiterentwicklungen der Physiksimsulationsbibliotheken werden dieses Problem jedoch in wenigen Jahren lösen helfen und die Simulation komplexer virtueller Szenen in Echtzeit ermöglichen (EGERMEIER 2008).

In der beschriebenen Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup> werden bisher nur sehr einfache kinematische Vorgänge unterstützt, die nicht für alle Produktionsanlagen ausreichend sind. Es wurde bewusst darauf verzichtet, komplexe Kinematik in Ve<sup>3</sup> zu integrieren, da dies bereits Stand der Technik ist und somit als gelöst eingestuft werden kann. Ebenso ist eine externe Anbindung von weiteren Simulationsprogrammen in Ve<sup>3</sup> möglich, um zum Beispiel das Bewegungsverhalten eines Industrieroboters in der Physiksimulation abzubilden. In größeren Produktionsanlagen sind Industrieroboter häufig für Montage- und Handhabungsaufgaben von Bedeutung.

Physikalische Effekte wie Umwelteinflüsse (z. B. Veränderung der Luftfeuchtigkeit) können mit einer Starrkörpersimulation nicht abgebildet werden. Diese spielen jedoch in einigen Industriezweigen (z. B. Verpackungsindustrie) eine wichtige Rolle, da sich dadurch das Prozessverhalten der Materialien (z. B. Kartonagen) ändern kann. Algorithmen zur Berechnung derartiger Effekte sind derzeit noch nicht echtzeitfähig und können deshalb nicht verwendet werden.

Es sei an dieser Stelle auch darauf hingewiesen, dass zeitlich zu lange VR-Sitzungen bei manchen Menschen zur so genannten Cybersickness führen können. Diese Krankheit hat u. a. Kopfschmerzen, Schweißausbrüche und Schwindelgefühl zur Folge und kann zu Koordinationsstörungen oder auch Erbrechen führen. Für die Entwicklung mit der Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup> ist deshalb eher der Ansatz der Simulation am Arbeitsplatz zu wählen. Für Vorführungen empfiehlt sich aber eine Visualisierung an der Powerwall, um die gefundenen Lösungen in einer Gruppe diskutieren zu können.

## 7.4 Wirtschaftliche Bewertung

Um eine wirtschaftliche Bewertung durchführen zu können, müssen zunächst die Kosten für den Einsatz einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen berechnet werden. Diese gliedern sich in Kosten für Hardware und für Software, wobei die Kosten für die Steuerungstechnik nicht berücksichtigt werden, weil die Steuerung als Teil der Produktionsanlage betrachtet wird und für die Simulation nur etwas früher im Projektverlauf beschafft werden muss. Die hierbei entstehenden Mehrkosten für den Zinsaufwand werden als vernachlässigbar angesehen. Die Kosten für die hardwaretechnische Umsetzung sind skalierbar, da die teuersten Komponenten optional sind (siehe Tabelle 7-1) und nur für Vorführungen und Gruppendiskussion wirklich von Nutzen sind. Eine Grundausstattung an Hardware für derzeit rund 7.300 € reicht aus, um eine grundsätzliche Simulation einer Produktionsanlage mit Physikmodellen durchführen zu können. In der größten Ausbaustufe betragen die Kosten für Hardware gegenwärtig ca. 136.300 €. Hier ist allerdings anzuführen, dass die Hauptkosten auf das Projektionssystem entfallen, das in einigen Unternehmen bereits vor Jahren beschafft wurden und für den beschriebenen Ansatz verwendet werden könnte. Im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren bedeutet dies eine Kostensteigerung von ca. 3.000 € für den Simulationsrechner Ve<sup>3</sup>, da alle anderen nicht optionalen Positionen bisher auch für eine virtuelle Inbetriebnahme benötigt wurden.

<b>Position</b>	<b>Hardware</b>	<b>Preis</b>	<b>Optional</b>
1	Simulationsrechner Ve <sup>3</sup>	3.000 €	nein
2	Simulationsrechner WinMOD®	2.000 €	nein
3	SIMBApro PCI-Einstekkarte	1.800 €	nein
4	Monitor, Tastatur, Maus, Netzwerkbedarf	500 €	nein
5	Projektionssystem Powerwall IC:One (zwei Beamer mit Projektionsfläche) inklusive Software für 3-D-Stereo-Präsentation	105.000 €	ja
6	Optisches Trackingsystem mit Trackingrechner und Eingabegerät	24.000 €	ja
<b>Gesamtkosten (maximale Ausbaustufe)</b>		<b>136.300 €</b>	

*Tabelle 7-1: Hardwarekosten für den Aufbau des Teststandes gemäß Abschnitt 6.5 auf der Basis des derzeitigen Preisniveaus*

Die Kosten für die notwendige Software belaufen sich insgesamt auf ca. 6.450 € (siehe Tabelle 7-2) und sind somit nahezu gleich hoch wie die Kosten für Softwarelizenzen für eine herkömmliche virtuelle Inbetriebnahme. Unberücksichtigt bleiben hierbei die Kosten für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsumgebung Ve<sup>3</sup>.

Insgesamt fallen die Anschaffungskosten damit nur unwesentlich höher aus als bei den herkömmlichen Ansätzen für die virtuelle Inbetriebnahme, deren grundätzliche Wirtschaftlichkeit bereits in WÜNSCH 2008 gezeigt wurde. Im Gegensatz zu den bisherigen Verfahren kann beim in dieser Arbeit beschriebenen Ansatz die Modellerstellung für das Materialflussmodell um ca. 40 % reduziert werden. Diese Schätzung beruht auf den Versuchsergebnissen, die bei der Erprobung mit der in Abschnitt 6.6 beschriebenen Anwendung gewonnen werden konnten. Die Erstellung eines Materialflussmodells kann mit ca. 50 % der gesamten Modellerstellung für die virtuelle Inbetriebnahme angesetzt werden und liegt schon bei mittleren Simulationsprojekten oft in der Größenordnung von zehn Personentagen. Da für die Erstellung eines Materialflussmodells sehr gute Kenntnisse sowohl bezüglich der Produktionsanlage als auch der Simulations-

umgebung notwendig sind, kann der Tagessatz für einen Mitarbeiter in diesem Aufgabenbereich mit ca. 800 € angenommen werden, so dass eine Reduzierung von z. B. 40 % schon bei mittelgroßen Simulationsprojekten eine deutliche Kostenersparnis (ca. 4.000 €) bedeutet.

Position	Software	Preis	Optional
1	Betriebssystem (3 Windows XP Prof. Lizenzen)	450 €	nein
2	Softwarelizenz WinMOD® (Grundsystem und Profibus-Modul)	6.000 €	nein
<b>Gesamtkosten</b>		<b>6.450 €</b>	

Tabelle 7-2: Softwarekosten für den Aufbau des Teststandes gemäß Abschnitt 6.5 auf Basis aktueller Preisangebote

Durch das zusätzliche Einsparpotenzial bei der Modellerstellung im Vergleich zu den bisherigen Verfahren der virtuellen Inbetriebnahme können die Anschaffungskosten für die virtuelle Inbetriebnahme noch schneller amortisiert werden. Schon bei wenigen Produktionsanlagen pro Jahr kann eine Amortisierung nach zwei Jahren eintreten.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Qualität eines Produktes ist einer der wichtigsten Faktoren, um an einem Hochlohnstandort eine Produktionsstätte erfolgreich zu betreiben. Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau boomt seit vielen Jahren, da vor allem die Qualität der hergestellten Produktionsanlagen überzeugt, die auf einen strukturierten Entwicklungsprozess zurückzuführen ist. Zu diesem gehört vor allem ein umfangreicher Test vor Auslieferung der Produktionsanlage, um den Zeitaufwand der realen Inbetriebnahme vor Ort beim Kunden möglichst gering zu halten.

In den letzten Jahren hat sich deshalb vor allem die virtuelle Inbetriebnahme durchgesetzt, mit welcher der Steuerungscode an einem virtuellen Simulationsmodell der Produktionsanlage getestet und Fehlerfälle nachgestellt werden können. Allerdings ist der Aufwand für die Erstellung des Simulationsmodells erheblich, weshalb eine konsequente Durchführung häufig an fehlenden Ressourcen oder sogar an der Wirtschaftlichkeit scheitert. Die Komplexität der Modellerstellung verhindert darüber hinaus, dass bereits während der Entwicklung des Steuerungscodes ein Simulationsmodell zur Verfügung steht. So müssen am Ende des Entwicklungsprozesses Fehler gesucht und beseitigt werden, anstatt diese bereits von Anfang an zu vermeiden.

Die in dieser Arbeit beschriebene Verwendung von Physikmodellen für die virtuelle Inbetriebnahme ist deshalb ein wichtiger Schritt für einen integrierten Entwicklungsprozess. Der Ansatz bietet die Möglichkeit, den Aufwand für die Erstellung des Materialflussmodells deutlich zu reduzieren bzw. den Prozess der Modellerstellung teilweise zu automatisieren. Dieses Verfahren revolutioniert die Steuerungsprogrammierung, weil der entwickelte Code Schritt für Schritt direkt an einem Simulationsmodell getestet werden kann. Neben der Aufwandsreduzierung bietet der Einsatz von Physikmodellen eine deutliche Steigerung der Aussagekraft der Simulation. Durch die physikalischen Effekte, die in der Simulation berücksichtigt werden, können in Zukunft ohne weiteren Programmieraufwand Test- und Fehlerfälle (z. B. Staubildung im Materialfluss) nachgestellt werden, die bislang nicht oder nur mit unwirtschaftlich hohem Aufwand simuliert werden konnten. Auf diese Weise ist es möglich, die Zuverlässigkeit der Produktionsanlagen und damit auch die Qualität zu steigern.

Durch die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsplattform Ve<sup>3</sup> konnte die generelle Machbarkeit des beschriebenen Ansatzes nachgewiesen werden. Bei den durchgeführten Tests konnten verschiedene Themen identifiziert werden,

die enormes Potenzial für Weiterentwicklungen vermuten lassen. Um zum Beispiel zukünftig große Simulationsszenarien an herkömmlichen Arbeitsplatzrechnern zu simulieren, wäre es sinnvoll, gewisse Heuristiken zur Reduzierung des Rechenaufwands einzusetzen (z. B. ruhende Objekte, die für die Simulation im aktuellen Zeitschritt irrelevant sind, vorübergehend aus der Berechnung zu nehmen). Ebenso großes Potenzial liegt in der Verbesserung der implementierten Reibungsberechnungen, die zwar für den Test von Steuerungslogik ausreichende und valide Ergebnisse liefern, jedoch für die realitätsgetreue Simulation einer Produktionsanlage zu ungenau sind.

Die Simulationsplattform Ve<sup>3</sup> unterstützt bisher nur sehr wenige Sensorarten. Die eingesetzte Sensorik in Produktionsanlagen wird jedoch zunehmend intelligent (z. B. bildverarbeitende Systeme), so dass auch der Anspruch an die Simulation steigt. Durch den Einsatz von Texturen auf den Simulationsobjekten könnten Algorithmen der Bildverarbeitung schon am laufenden Modell der Anlage vor Aufbau der eigentlichen Produktionsanlage getestet werden. Das größte Potenzial für die Weiterentwicklung einer Simulationsplattform zur Entwicklung und Inbetriebnahme von Steuerungsprogrammen liegt aber in der Integration der Schaltlogik des Verhaltensmodells in das Visualisierungsmodell. Durch diesen Ansatz wäre es dem Benutzer möglich, intuitiv den selektierten Sensor oder Aktor zu parametrieren bzw. auszulösen. Ein bislang erforderliches bitweises Setzen der Eingänge bzw. Ausgänge im Verhaltensmodell könnte so deutlich vereinfacht werden und würde die mit der Simulation notwendigen Verfahrensschritte deutlich beschleunigen. Außerdem könnte die virtuelle Inbetriebnahme zukünftig in einer Software und nicht wie bislang verteilt auf mehrere Programme durchgeführt werden.

Abschließend ist festzustellen, dass die Simulation einer Produktionsanlage auf Basis von Physikmodellen grundsätzlich möglich ist. Aufgrund der damit erreichbaren automatisierten und schnellen Modellerstellung kann die Wirtschaftlichkeit der virtuellen Inbetriebnahme untermauert und zugleich der Weg für einen integrierten Entwicklungsprozess geebnet werden. In dieser Arbeit konnte ein Beitrag dafür geleistet werden, der auch die Nutzenpotenziale des Ansatzes klar erkennen lässt, weshalb Forschung und Industrie diesen Ansatz weiter verfolgen sollten, um die Simulation von Produktionsanlagen und damit auch den Entwicklungsprozess grundlegend zu verbessern.

## 9 Literatur

3DCONNEXION 2008

3Dconnexion: 3Dconnexion, a Logitech Company  
<<http://www.3dconnexion.de>> - 03. Februar 2008.

AKENINE-MÖLLER & HAINES 2002

Akenine-Möller, T.; Haines, E.: Real-Time Rendering. 2. Auflage. Natick (MA) / USA: A K Peters 2002.

AURICH et al. 2007

Aurich, J. C.; Ostermayer, D.; Wagenknecht, C.: Integration von Materialflussimulation und FEM in die Virtuelle Realität. *wt Werkstatttechnik online* 97 (2007) 5, S. 369-375.

BANERJEE & ZETU 2001

Banerjee, P.; Zetu, D.: Virtual Manufacturing. New York, Chichester, Weinheim: John Wiley & Sons, Inc. 2001.

BARAFF 1989

Baraff, D.: Analytical Methods for Dynamic Simulation of Non-penetrating Rigid Bodies. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), Boston (MA) / USA, Juli 1989. ACM Press 1989, Band 23, S. 223-232.

BARAFF 1990

Baraff, D.: Curved Surfaces and Coherence for Non-penetrating Rigid Body Simulation. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), Dallas (TX) / USA, August 1990. ACM Press 1990, Band 24, S. 19-28.

BARAFF 1991

Baraff, D.: Coping with Friction for Non-penetrating Rigid Body Simulation. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), Las Vegas (NV) / USA, Juli 1991. ACM Press 1991, Band 25, S. 31-40.

BARAFF 1993

Baraff, D.: Non-penetrating Rigid Body Simulation. In: Eurographics '93 State of the Art Reports, Barcelona / Spanien, September 1993. 1993.

BARAFF 1994

Baraff, D.: Fast Contact Force Computation for Non-penetrating Rigid Bodies. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), Orlando (FL) / USA, Juli 1994. ACM Press 1994, Band 28, S. 23-34.

BARAFF & WITKIN 1997

Baraff, D.; Witkin, A.: Physically Based Modeling: Principles and Practice. In: Course Notes of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), Los Angeles (CA) / USA, August 1997. 1997.

**BARZEL & BARR 1988**

Barzel, R.; Barr, A. H.: A modeling system based on dynamic constraints. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), New York (NY) / USA, August 1988. ACM Press 1988, Band 22, S. 179-188.

**BENDER 2007**

Bender, J.: Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität. Diss. Universität Fridericiana Karlsruhe 2007.

**BENDER et al. 2003**

Bender, J.; Baas, M.; Schmitt, A.: Ein neues Verfahren für die mechanische Simulation in VR-Systemen und in der Robotik. In: Hohmann, R. (Hrsg.): Proceedings des 17. Symposiums Simulationstechnik (ASIM), Erlangen, September 2003. SCS-European Publishing House 2003, S. 111-116.

**BENDER et al. 2005a**

Bender, J.; Finkenzeller, D.; Schmitt, A.: An impulse-based dynamic simulation system for VR applications. In: Proceedings of the Virtual Concept 2005, Biarritz / Frankreich, 08. - 10. November 2005. Springer 2005a.

**BENDER et al. 2005b**

Bender, K.; Dominka, S.; Koc, A.; Pöschl, M.; Russ, M.; Stützel, B.: Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer 2005.

**BOEING & BRÄUNL 2007**

Boeing, A.; Bräunl, T.: Evaluation of real-time physics simulation systems. In: Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia, Perth / Australien, 01. - 04. Dezember 2007. ACM Press 2007, S. 281-288.

**BOWMAN et al. 2001**

Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola, J.; Poupyrev, I.: An Introduction to 3D User Interface Design. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 10 (2001) 1, S. 96-108.

**BOWMAN et al. 2005**

Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola, J.; Poupyrev, I.: 3D User Interfaces - Theory and Practice. Addison-Wesley 2005.

**BURDEA 2003**

Burdea, G. C.: Force and Touch Feedback for Virtual Reality. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2003.

**BURDEA & COIFFET 2003**

Burdea, G. C.; Coiffet, P.: Virtual Reality Technology. 2. Auflage. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2003.

**CAMERON 1996**

Cameron, S. A.: A Comparison of Two Fast Algorithms for Computing the Distance Between Convex Polyhedra. In: Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Minneapolis (MN) / USA, April 1996. 1996, S. 915-920.

**CAMERON 1997**

Cameron, S. A.: Enhancing GJK: Computing Minimum and Penetration Distances between Convex Polyhedra. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Albuquerque (NM) / USA, 20. - 25. April 1997. 1997, S. 3112-3117.

**CHARWAT 1994**

Charwat, H. J.: Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation. 2. Auflage. München: R. Oldenbourg Verlag 1994.

**COHEN et al. 1995**

Cohen, J. D.; Lin, M. C.; Manocha, D.; Ponamgi, M. K.: I-COLLIDE: An Interactive and Exact Collision Detection System for Large-Scale Environments. In: Symposium on Interactive 3D Graphics. 1995, S. 189-196.

**COTTLE et al. 1992**

Cottle, R. W.; Pang, J. S.; Stone, R. E.: The Linear Complementarity Problem. Boston (MA) / USA: Academic Press 1992.

**EBERLY 2004**

Eberly, D.: Game Physics. San Francisco (CA) / USA: Morgan Kaufmann 2004.

**ECKSTEIN 1999**

Eckstein, J.: Echtzeitfähige Kollisionserkennung für Virtual Reality Anwendungen. München: Utz 1999.

**EGERMEIER 2008**

Egermeier, H.: Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen. Diss. Technische Universität München 2008 (*iwb* Forschungsberichte 222).

**EGERMEIER & PETZOLD 2002**

Egermeier, H.; Petzold, B.: Ve<sup>2</sup> - Virtual Engineering Environment. *iwb* Newsletter 10 (2002), S. 6-7.

**EHMANN & LIN 2001**

Ehmann, S. A.; Lin, M. C.: Accurate and Fast Proximity Queries Between Polyhedra Using Convex Surface Decomposition. In: Eurographics 2001, Manchester / England, 03. - 07. September 2001. 2001, Band 20.

**EVERSHEIM 1990**

Eversheim, W.: Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.

**FOXLIN 2002**

Foxlin, E.: Motion Tracking Requirements and Technologies. In: Stanney, K. M. (Hrsg.): Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation and Applications. Mahwah (NJ) / USA: Lawrence Erlbaum 2002, S. 163-210.

**GILBERT et al. 1988**

Gilbert, E. G.; Johnson, D. W.; Keerthi, S. S.: A Fast Procedure for Computing the Distance Between Complex Objects in Three-Dimensional Space. In: Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Washington D. C. / USA, April 1988. IEEE Computer Society Press 1988, Band 2, S. 193-203.

**GILLESPIE & COLGATE 1997**

Gillespie, R.; Colgate, J.: A Survey of Multibody Dynamics for Virtual Environments. In: ASME Dynamic Systems and Control Division, Dallas (TX) / USA. 1997, S. 45-54.

**GOLDSTEIN et al. 2002**

Goldstein, H.; Poole, C. P.; Safko, J. L.: Klassische Mechanik. 3. Auflage. Weinheim: John Wiley & Sons, Inc. 2002.

**GRÄTZ 2006**

Grätz, F.: Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme. Diss. Technische Universität München 2006 (*iwb Forschungsberichte* 200).

**GÜNTHER et al. 2008**

Günther, W. A.; Durchholz, J.; Kraul, R.; Schneider, O.: Technologie für die Logistik des 21. Jahrhunderts. In: Wimmer, T. et al. (Hrsg.): Kongressband zum 25. Deutschen Logistik-Kongress, Berlin. Deutscher-Verkehrs-Verlag 2008, S. 360-393.

**HASEGAWA & SATO 2004**

Hasegawa, S.; Sato, M.: Real-time Rigid Body Simulation for Haptic Interactions Based on Contact Volume of Polygonal Objects. Computer Graphics Forum 23 (2004) 3, S. 529-538.

**HINCKLEY et al. 1994**

Hinckley, K.; Pausch, R.; Goble, J. C.; Kassell, N. F.: A survey of design issues in spatial input. In: Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology, Marina del Rey (CA) / USA, 02. - 04. November 1994. ACM Press 1994, S. 213-222.

**HUBBARD 1996**

Hubbard, P. M.: Approximating polyhedra with spheres for time-critical collision detection. ACM Transactions on Graphics (TOG) 15 (1996) 3, S. 179-210.

**LENNERZ 2002**

Lennerz, C.: Impulsbasierte Dynamiksimulation starrer Körper unter Verwendung von Hüllkörperhierarchien. 2002.

**LIN 1993**

Lin, M. C.: Efficient Collision Detection for Animation and Robotics. Diss. PhD. University of California Berkely (CA) / USA 1993.

**LIN & CANNY 1991**

Lin, M. C.; Canny, J. F.: A Fast Algorithm for Incremental Distance Calculation. In: Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Sacramento (CA) / USA, April 1991. 1991, S. 1008-1014.

**LIN & GOTTSCHALK 1998**

Lin, M. C.; Gottschalk, S.: Collision detection between geometric models: a survey. In: Cripps, R. (Hrsg.): Proceedings of the 8th IMA Conference on Mathematics of Surfaces, Birmingham / England, 31. August - 02. September 1998. Information Geometers 1998, Band 8, S. 37-56.

**LUCIANO et al. 2004**

Luciano, C.; Banerjee, P.; DeFanti, T.; Mehrota, S.: Realistic Cross-Platform Haptic Applications Using Freely-Available Libraries. In: Proceedings of the 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, in conjunction with IEEE Virtual Reality 2004, Chicago (IL) / USA. 2004, S. 282-289.

**MEWES 2005**

Mewes, J.: Virtuelle Inbetriebnahme mit realen Automatisierungssystemen und virtuellen Maschinen. In: Deutsch-Niederländische Automatisierungstage 2005, Emden. 2005.

**MEWES 2007**

Mewes, J.: WinMOD 5 Real-Time Simulation Center for Automation <<http://www.winmod.de/deu/>> - 12. November 2007.

**MILLINGTON 2007**

Millington, I.: Game Physics Engine Development. San Francisco (CA) / USA: Morgan Kaufmann 2007.

**MIRTICH 1995**

Mirtich, B.: Hybrid Simulation: Combining Constraints and Impulses. In: Proceedings of the First Workshop on Simulation and Interaction in Virtual Environments, Juli. 1995.

**MIRTICH 1996**

Mirtich, B.: Impulse-based Dynamic Simulation of Rigid Body Systems. Diss. University of California Berkeley (CA) / USA 1996.

**MIRTICH 1998a**

Mirtich, B.: Rigid Body Contact: Collision Detection to Force Computation. Mitsubishi Electrical Research Laboratory 1998.

**MIRTICH 1998b**

Mirtich, B.: V-Clip: fast and robust polyhedral collision detection. ACM Transactions on Graphics (TOG) 17 (1998) 3, S. 177-208.

**MIRTICH & CANNY 1994**

Mirtich, B.; Canny, J. F.: Impulse-Based Dynamic Simulation. Berkeley (CA) / USA: EECS Department, University of California 1994.

**MIRTICH & CANNY 1995**

Mirtich, B.; Canny, J. F.: Impulse-Based Simulation of Rigid Bodies. In: ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics, New York (NY) / USA, April 1995. ACM Press 1995, S. 181-188.

**MOORE & WILHELM 1988**

Moore, M.; Wilhelms, J.: Collision Detection and Response for Computer Animation. Computer Graphics 22 (1988), S. 289-298.

**MUNZERT et al. 2004**

Munzert, U.; Pörnbacher, C.; Wünsch, G.; Zäh, M. F.: Vorabinbetriebnahme und Qualitätssicherung von Steuerungssoftware durch Simulation. In: Tagungsband zum 8. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, Juni 2004. 2004.

**PAL 2008**

PAL: Physical Abstraction Layer <<http://pal.sourceforge.net>> - 16. Mai 2008.

**PARENT 2002**

Parent, R.: Computer Animation: Algorithms and Techniques. San Francisco (CA) / USA: Morgan Kaufmann 2002.

**PATRON 2005**

Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Diss. Technische Universität München 2005 (*iwb* Forschungsberichte 190).

**PLATT & BARR 1988**

Platt, J. C.; Barr, A. H.: Constraints methods for flexible models. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), New York (NY) / USA, August 1988. ACM Press 1988, Band 22, S. 279-288.

**PONAMGI et al. 1997**

Ponamgi, M. K.; Manocha, D.; Lin, M. C.: Incremental Algorithms for Collision Detection Between Polygonal Models. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 3 (1997), S. 51-64.

**PRITSCHOW 2002**

Pritschow, G.: Auf dem Weg in die virtuelle Produktion. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 5.

**REGGIANI et al. 2002**

Reggiani, M.; Mazzoli, M.; Caselli, S.: An experimental evaluation of collision detection packages for robot motion planning. In: Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 2002. 2002, S. 2229-2334.

**REINHART et al. 2007**

Reinhart, G.; Hensel, T.; Lindworsky, A.; Spitzweg, M.: Teilautomatisierter Aufbau von Simulationsmodellen. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007) 9.

**REINHART & SPITZWEG 2007**

Reinhart, G.; Spitzweg, M.: Einsatz von Physikmodellen zur Simulation bei der Entwicklung von Maschinen und Anlagen. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn, Juni 2007. W. V. Westfalia Druck GmbH 2007, Band 209, S. 333-348.

**ROSSMANN & WISCHNEWSKI 2007**

Rossmann, J.; Wischnewski, R.: Realitätsnahe Simulation und Visualisierung industrieller Transportprozesse in VR-Anwendungen. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn, Juni 2007. W. V. Westfalia Druck GmbH 2007, Band 209, S. 111-125.

**RUBIN & WHITTED 1980**

Rubin, S. M.; Whitted, T.: A 3-dimensional representation for fast rendering of complex scenes. In: Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Seattle (WA) / USA. ACM Press 1980, S. 110-116.

**SAUER & SCHÖMER 1998**

Sauer, J.; Schömer, E.: Dynamiksimulation starrer Körper für Virtual Reality Anwendungen. In: Engel, M. et al. (Hrsg.): Proceedings des 12. Symposiums Simulationstechnik (ASIM), Zürich, September 1998. Vdf Hochschulverlag AG 1998, S. 355-362.

**SAUER et al. 1998**

Sauer, J.; Schömer, E.; Lennerz, C.: Real-Time Rigid Body Simulations of some 'Classical Mechanical Toys'. In: Proceedings of 10th European Simulation Symposium (ESS), Nottingham / United Kingdom, Oktober 1998. 1998, S. 93-98.

**SCHMITT & BENDER 2005**

Schmitt, A.; Bender, J.: Impulse-Based Dynamic Simulation of Multibody Systems: Numerical Comparison with Standard Methods. In: Proceedings of the Automation of Discrete Production Engineering, Sozopol / Bulgarien, 09. - 12. September 2005. 2005, S. 324-329.

**SCHNELL et al. 1991**

Schnell, G.; Conrady, H.-G.; Dietrich, F.; Frömel, G.; Göddertz, J.; Helm, W.; Kessler, M.; Knittel, T.; Lindner, K.-P.; Olbrecht, T.; Probst, S.; Schaefer, W.: Sensoren in der Automatisierungstechnik. Braunschweig: Vieweg 1991.

**SCHUSTER 1992**

Schuster, G.: Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage. Diss. Technische Universität München 1992 (*iwb* Forschungsberichte 55).

**SIEMENS 2007**

Siemens: Sinumerik Machine Simulator  
<<http://www.automation.siemens.com/mc/mc-sol/de/52efb502-3c55-4228-b720-adf38a53ff81/index.aspx>> - 12. November 2007.

**SMITH 2006**

Smith, R.: Open Dynamics Engine <<http://www.ode.org>> - 31. Juli 2006.

**SPATH 2005**

Spath, D.: Integrierte Konstruktion und Planung mit Virtual Reality. In: ICIDO Summit "Next Generation VR", Juni 2005. 2005.

**SPATH & LANDWEHR 2000**

Spath, D.; Landwehr, R.: 3-D-Projektierung und Simulation von Ablaufsteuerungen. *wt Werkstattstechnik online* 90 (2000) 7/8.

**SPITZWEG et al. 2004**

Spitzweg, M.; Egermeier, H.; Petzold, B.: Montagesimulation mit Kraftrückkopplung im *iwb* VR-System Ve<sup>2</sup>. *iwb* Newsletter 12 (2004), S. 5-6.

**STEFFAN 2001**

Steffan, R.: Multimodale Interaktionstechniken für die Simulation von Montagevorgängen in virtuellen Umgebungen. Berlin: Mensch-und-Buch-Verlag 2001.

**STETTER 1993**

Stetter, R.: Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes. Diss. Technische Universität München 1993 (*iwb* Forschungsberichte 62).

**STETTER 2005**

Stetter, R.: Virtuelle Automatisierungswelten. A&D Kompendium (2005), S. 70-72.

**STETTER 2006a**

Stetter, R.: Simulationsansätze und Virtuelle Inbetriebnahme. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?, München, September 2006. Utz 2006, S. 3-1 - 3-13. (*iwb Seminarberichte*).

**STETTER 2006b**

Stetter, R.: Virtuelle Welten - reale Vorteile. A&D Kompendium (2006), S. 234-235.

**STEWART & TRINKLE 1996**

Stewart, D. E.; Trinkle, J. C.: An Implicit Time-Stepping Scheme for Rigid Body Dynamics with Inelastic Collisions and Coulomb Friction. International Journal of Numerical Methods in Engineering (1996) 39, S. 2673-2691.

**STEWART & TRINKLE 2000**

Stewart, D. E.; Trinkle, J. C.: An Implicit Time-Stepping Scheme for Rigid Body Dynamics with Coulomb Friction. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), San Francisco (CA) / USA, 24. - 28. April 2000. 2000, S. 162-169.

**STUART 1996**

Stuart, R.: The design of virtual environments. McGraw-Hill, Inc. 1996.

**TRINKLE et al. 1997**

Trinkle, J. C.; Pang, J. S.; Sudarsky, S.; Lo, G.: On Dynamic Multi-Rigid-Body Contact Problems with Coulomb Friction. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 77 (1997) 4, S. 267-279.

**VAN DEN BERGEN 2004**

van den Bergen, G.: Collision Detection in Interactive 3D Environments. Amsterdam, Boston, Heidelberg: Morgan Kaufmann 2004.

**VDI-RICHTLINIE 1993**

VDI-Richtlinie: VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Berlin: Beuth 1993.

**VDW-BERICHT 1997**

VDW-Bericht: Abteilungsübergreifende Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen. Aachen: WZL 1997.

**WATT 2002**

Watt, A.: 3D-Computergrafik. 3. Auflage. München: Pearson Studium 2002.

**WEGHORST et al. 1984**

Weghorst, H.; Hooper, G.; Greenberg, D. P.: Improved Computational Methods for Ray Tracing. ACM Transactions on Graphics (TOG) 3 (1984) 1, S. 52-69.

**WISCHNEWSKI 2007**

Wischnewski, R.: Transportsysteme mit Spurführung in der Virtuellen Produktion. Diss. RWTH Aachen 2007 (Fortschritt-Berichte VDI).

## WÜNSCH 2008

Wünsch, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Diss. Technische Universität München 2008 (*iwb Forschungsberichte* 215).

## WÜNSCH &amp; ZÄH 2005a

Wünsch, G.; Zäh, M. F.: Eine neue Methode für die schnelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen. In: Mechatronik, B. K. f. (Hrsg.): Tagungsband zum Bayerischen Fachforum Mechatronik 2005, September 2005. 2005, S. 755-775.

## WÜNSCH &amp; ZÄH 2005b

Wünsch, G.; Zäh, M. F.: A New Method for Fast Plant Start-Up. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV), München, September 2005. Utz 2005, S. 249-255.

## ZACHMANN 2000

Zachmann, G.: Virtual Reality in Assembly Simulation - Collision Detection, Simulation Algorithms and Interaction Techniques. Diss. Technische Universität Darmstadt 2000.

## ZÄH et al. 2004a

Zäh, M. F.; Ehrenstraßer, M.; Pörnbacher, C.; Wünsch, G.: Simulation von Maschinenabläufen an virtuellen Werkzeugmaschinen. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V. 2004.

## ZÄH et al. 2004b

Zäh, M. F.; Menzel, T.; Wünsch, G.; Pörnbacher, C.: Virtuelle Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen - Qualitätssicherung von Steuerungssoftware. In: Tagungsband zum Bayerischen Fachforum Mechatronik 2004, Augsburg, Oktober 2004. 2004, S. 13-11 - 13-26.

## ZÄH et al. 2004c

Zäh, M. F.; Munzert, U.; Wünsch, G.: Simulation von Montageanlagen in der Automobilindustrie - Hardware-in-the-Loop-Technologie für den Virtual Ramp-up. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 1/2/2004 (2004).

## ZÄH et al. 2004d

Zäh, M. F.; Petzold, B.; Spitzweg, M.; Egermeier, H.: Realitätsnahe Einbausimulation mit Ve<sup>e</sup>. wt Werkstatttechnik online 94 (2004) 9, S. 410-413.

## ZÄH et al. 2004e

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Wünsch, G.; Munzert, U.: Virtuelle Inbetriebnahme im Regelkreis des Fabriklebenszyklus'. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Produktionssystemplanung, Garching, September 2004. Utz 2004, Band 74, S. 1-2 - 1-21.

## ZÄH et al. 2007

Zäh, M. F.; Petzold, B.; Spitzweg, M.; Vogl, W.: Anwendungsbereiche in der Industrie. In: Beschaffung, B. f. W. u. (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie. In: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie (8. Ergänzungslieferung). Koblenz: 2007.



## 10 Anhang

### 10.1 Formelverzeichnis

Zeichen	Erklärung
a	Punkt a
A	Polyeder A
b	Punkt b
B	Polyeder B
d	Distanz
$F_A$	Feature des Polyeders A
$F_B$	Feature des Polyeders B
m	Anzahl der statischen Geometrien
min	Minimumsfunktion
n	Anzahl der dynamischen Geometrien
N	Normalenvektor
$O(1)$	Landausymbol für konstante Komplexität
$O(n)$	Landausymbol für lineare Komplexität
$O(n^2)$	Landausymbol für quadratische Komplexität
P	Kontaktpunkt
$r_{ij}$	Konstanter Abstand aller Punktpaare $i$ und $j$
V	Voronoi-Region
$V_A$	Geschwindigkeitsvektor des Polyeders A
x	Abszisse (horizontale Koordinatenachse)
y	Ordinate (senkrechte Koordinatenachse)
z	Applikate (räumliche Koordinatenachse)

## 10.2 Herstellerverzeichnis

*GSL - Software-Bibliothek für mathematische Operationen*

Free Software Foundation, Inc.,  
51 Franklin St, Fifth Floor  
Boston, MA 02110  
USA

<<http://www.gnu.org/software/gsl/>>

*IC:One - Projektionssystem*

ICIDO GmbH  
Jurastrasse 8  
D - 70565 Stuttgart  
<[www.icido.de](http://www.icido.de)>

*ODE - Software-Bibliothek für Physiksimulation*

Open Dynamics Engine  
<<http://www.ode.org>>

*Rumblepad II Cordless - Interaktionsgeräte*

LOGITECH GmbH  
Streiflacher Strasse 7  
D - 82110 GERMERING  
<[www.logitech.de](http://www.logitech.de)>

*S7, SIMBApro PCI - Steuerung, Schnittstellenkarten und Zubehör*

Siemens AG  
Wittelsbacherplatz 2  
D - 80333 München  
<<http://www.siemens.de>>

*Trackingsystem und Zubehör*

Advanced Realtime Tracking GmbH  
Am Öferl 6  
D - 82362 Weilheim  
<[www.ar-tracking.de](http://www.ar-tracking.de)>

*VizUp – Software zur Polygonreduzierung*

VizUp, Inc.  
550 Burrard Street, Suite 215  
Vancouver, BC V6C 2B5  
Canada  
<<http://www.vizup.net>>

*WinMOD - Software für Verhaltenssimulation*

Mewes & Partner GmbH  
Neuendorfstrasse 15  
D - 16761 Hennigsdorf  
<<http://www.winmod.de>>

*Xerces XML Parser - Software-Bibliothek für XML-Konfiguration*

The Apache Software Foundation  
1901 Munsey Drive  
Forest Hill, MD 21050-2747  
USA  
<<http://xerces.apache.org>>



# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- |    |  |    |   |
|----|--|----|---|
| 1  | <i>Streifinger, E.</i><br>Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel<br>1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3        | 14 | <i>Graha, A.</i><br>Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme<br>1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8                        |
| 2  | <i>Fuchsberger, A.</i><br>Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen<br>1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1   | 15 | <i>Riese, K.</i><br>Klipsmontage mit Industrierobotern<br>1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6  |
| 3  | <i>Meier, C.</i><br>Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern<br>1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X                            | 16 | <i>Lutz, P.</i><br>Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung<br>1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3                                    |
| 4  | <i>Sommer, H.</i><br>Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen<br>1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8  | 17 | <i>Klippel, C.</i><br>Mobilier Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems<br>1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0                    |
| 5  | <i>Simon, W.</i><br>Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen<br>1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9   | 18 | <i>Rascher, R.</i><br>Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung<br>1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9                   |
| 6  | <i>Büchs, S.</i><br>Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung<br>1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7                                    | 19 | <i>Heuster, H.-J.</i><br>Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme<br>1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5                               |
| 7  | <i>Hunzinger, I.</i><br>Schneidrodierte Oberflächen<br>1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5  | 20 | <i>Kirchknopf, P.</i><br>Ermittlung modularer Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen<br>1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3                      |
| 8  | <i>Pilland, U.</i><br>Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen<br>1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2  | 21 | <i>Sauerer, Ch.</i><br>Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen<br>1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51869-1                                  |
| 9  | <i>Barthelmels, P.</i><br>Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung<br>1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2 | 22 | <i>Karstedt, K.</i><br>Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung<br>1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7       |
| 10 | <i>Reithofer, N.</i><br>Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen<br>1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6                              | 23 | <i>Peiker, St.</i><br>Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems<br>1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0                                     |
| 11 | <i>Diess, H.</i><br>Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse<br>1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5                           | 24 | <i>Schugmann, R.</i><br>Nachgebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage<br>1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0                        |
| 12 | <i>Reinhart, G.</i><br>Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze<br>1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1             | 25 | <i>Wrba, P.</i><br>Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik<br>1990 · 126 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X                                       |
| 13 | <i>Bürstner, H.</i><br>Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion<br>1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6                                  | 26 | <i>Eibelhäuser, P.</i><br>Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusregulation<br>1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7 |
|    |  | 27 | <i>Prasch, J.</i><br>Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie<br>1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2           |

- 28 Teich, K.  
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfraun, W.  
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.  
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.  
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.  
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzek, H.  
Inspektion von Karosserierechteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.  
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.  
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.  
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.  
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.  
Dynamisches Verhalten von Kreissägen  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.  
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile  
1991 · 88 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.  
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.  
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.  
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hößmann, J.  
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55200-0
- 44 Petry, M.  
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebeprozesse  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.  
Integrierte Diagnose in Produktionszellen  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.  
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.  
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schräfer, N.  
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 Gernicke, F.  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.  
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 Gleas, W.  
Rechnerintegrierte Kabelfertigung  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.  
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.  
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.  
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bonn, H.  
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.  
Qualitäts sicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.  
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.  
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strahmayer, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Gles, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Steitler, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dindorfner, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummesteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionsystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Armann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionsystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationsystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zettelmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
**Auftragsleitechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifarbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflussteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutschle, U.*  
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personorientierte Montageplanung für komplexe und varianteureiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1995 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischetsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen varianteureichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Kröner, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindmaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-9
- 116 *Koehler, J.*  
**Prozessorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
**Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen**  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
**Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung**  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
**Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen**  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfab, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgelernte Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionsstufen  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 23 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen**  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**  
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 Ergfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**  
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**  
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapself zu den aseptischen Ampullen**  
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**  
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**  
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**  
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**  
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**  
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**  
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**  
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**  
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlanke im Mittelstand**  
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**  
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**  
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

# Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Günter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszelten**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißenberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme**  
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinger  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl  
**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**  
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron  
**Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung**  
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek  
**Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen**  
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer  
**Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried  
**Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern**  
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner  
**Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion**  
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich  
**Erhöhung des Nutzunggrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen**  
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl  
**Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern**  
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann  
**Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge**  
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0613-3
- 199 Michael Schilp  
**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage**  
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz  
**Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme**  
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner  
**Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding**  
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein  
**Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation**  
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren  
**Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse**  
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf  
**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie**  
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Gribsch  
**Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia**  
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer  
**Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**  
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack  
**Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik**  
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff  
**Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion**  
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller  
**Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen**  
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler  
**Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickensrieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten Kleben großflächiger Bauteile**  
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller  
**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl  
**Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen**  
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiraumen**  
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold  
**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage**  
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis  
**Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl  
**Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig  
**Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck  
**Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie**  
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier  
**Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthias Sigl  
**Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns**  
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller  
**Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets**  
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner  
**Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie**  
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann  
**Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen**  
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy  
**Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry**  
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl  
**Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl  
**Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess**  
2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann  
**Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels**  
2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise  
**Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht  
**Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg  
**Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen**  
2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4

