





Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
der Technischen Universität München

# **Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen**

**Hans Christian Egermeier**

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. Florian Holzapfel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. apl. Prof. Dr.-Ing. Dieter Weidlich,  
Technische Universität Chemnitz

Die Dissertation wurde am 04.03.2008 bei der Technischen Universität  
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am  
07.06.2008 angenommen.





Hans Egermeier

**Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems  
für die Montagesimulation  
mit kraftrückkoppelnden Handschuhen**



Herbert Utz Verlag · München

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

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 · 2008

ISBN 978-3-8316-0833-1

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.

Michael Zäh

Gunther Reinhart



## Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter des Lehrstuhls für Montagesysteme und Betriebswissenschaften, für die stets wohlwollende Förderung und Unterstützung meiner wissenschaftlichen Arbeit und meines beruflichen Werdegangs.

Bei Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Dieter Weidlich, tätig an der Professur für Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik und Leiter des Virtual Reality Center Production Engineering der Technischen Universität Chemnitz, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats bedanken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel, dem Leiter des Lehrstuhls für Flugsystemdynamik, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des *iwb* sowie bei allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Erstellung der Arbeit unterstützt haben. Insbesondere möchte ich dabei Dr.-Ing. Bernd Petzold für die langjährige intensive Zusammenarbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt zudem Herrn Dipl.-Inf. Michael Spitzweg, nicht nur als Mitglied des VR-Teams, sondern auch gemeinsam mit Herrn Dr.-Ing. Daniel Siedl und meinem Vater Gerhard Egermeier für die aufmerksame und kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Bei meiner Freundin Susanne Platz möchte ich mich ebenfalls ganz besonders für ihr Verständnis und ihre liebevolle Unterstützung bedanken.

München, Juli 2008

Hans Egermeier



Meinen Eltern Rita und Gerhard Egermeier





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines . . . . .	1
1.2 Forschungsziel . . . . .	4
1.3 Vorgehensweise und Gliederung . . . . .	5
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Inhalt des Kapitels . . . . .	7
2.2 Montageplanung . . . . .	7
2.2.1 Begriffsbestimmung . . . . .	7
2.2.2 Planungsprozess . . . . .	8
2.2.3 Manuelle Montage . . . . .	11
2.2.4 Rechnerunterstützung . . . . .	12
2.3 Virtual-Reality in der Montageplanung . . . . .	16
2.3.1 Begriffsbestimmung . . . . .	16
2.3.2 Funktionsprinzip . . . . .	17
2.3.3 Interaktionsgeräte . . . . .	18
2.3.4 Einordnung in den rechnergestützten Planungsprozess . . . . .	24

2.3.5	Bestehende Ansätze . . . . .	25
2.4	Defizite und Handlungsbedarf . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>33</b>
3.1	Inhalt des Kapitels . . . . .	33
3.2	Benutzerinteraktion . . . . .	33
3.2.1	Psychologische Aspekte . . . . .	33
3.2.2	Physiologische Aspekte . . . . .	36
3.2.3	Regelungstechnische Aspekte . . . . .	40
3.2.4	Basisinteraktion . . . . .	42
3.2.5	Direkte Handinteraktion . . . . .	44
3.3	Handinteraktionsgeräte . . . . .	49
3.3.1	Allgemeines . . . . .	49
3.3.2	Sensorhandschuhe . . . . .	49
3.3.3	Tragbare haptische Handinteraktionsgeräte . . . . .	50
3.3.4	Bodengebundene haptische Handinteraktionsgeräte . . . . .	52
3.4	Kraftberechnung . . . . .	54
3.4.1	Allgemeines . . . . .	54
3.4.2	Kollisionserkennung . . . . .	55
3.4.3	Physik-basiertes Objektverhalten . . . . .	60
3.4.4	Haptisches Rendering . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Konzept</b>	<b>71</b>
4.1	Inhalt des Kapitels . . . . .	71
4.2	Anforderungen . . . . .	71
4.2.1	Methodische Anforderungen . . . . .	71
4.2.2	Technische Anforderungen . . . . .	73
4.3	Prozessintegration . . . . .	77
4.3.1	Makroebene . . . . .	77

4.3.2	Mikroebene . . . . .	79
4.4	Technische Konzeption . . . . .	82
4.4.1	Allgemeines . . . . .	82
4.4.2	Interaktionskonzept . . . . .	82
4.4.3	Interaktionsgerät . . . . .	83
4.4.4	Kollisionserkennung . . . . .	84
4.4.5	Physiksimulation . . . . .	85
4.4.6	Haptisches Rendering . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Umsetzung von <math>Ve^2</math></b>	<b>91</b>
5.1	Inhalt des Kapitels . . . . .	91
5.2	Systemarchitektur . . . . .	91
5.2.1	Allgemeines . . . . .	91
5.2.2	Grundstruktur . . . . .	91
5.2.3	Szenegraph . . . . .	94
5.2.4	Handmodell . . . . .	97
5.3	Systemabläufe . . . . .	101
5.3.1	Systemkreislauf . . . . .	101
5.3.2	Prozessstruktur . . . . .	103
5.3.3	Handsteuerung . . . . .	106
5.3.4	Anwendungssteuerung . . . . .	108
5.4	Systemkonfigurationen . . . . .	109
5.4.1	Allgemeines . . . . .	109
5.4.2	$Ve^2$ -Dateiformat . . . . .	111
5.4.3	Geräteauswahl . . . . .	112
5.4.4	Gesamtaufbau . . . . .	114
<b>6</b>	<b>Anwendung und Bewertung</b>	<b>117</b>
6.1	Inhalt des Kapitels . . . . .	117

6.2	Versuchsanwendungen . . . . .	117
6.2.1	Testablauf . . . . .	117
6.2.2	Testparameter . . . . .	119
6.2.3	Greiftests . . . . .	119
6.2.4	Fügetests . . . . .	131
6.2.5	Montagebeispiel . . . . .	137
6.3	Technische und wirtschaftliche Betrachtung . . . . .	141
6.3.1	Allgemeines . . . . .	141
6.3.2	Technische Betrachtung . . . . .	142
6.3.3	Wirtschaftliche Betrachtung . . . . .	145
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>181</b>
A.1	Unified Modeling Language (UML) . . . . .	181
A.1.1	Allgemeines . . . . .	181
A.1.2	Statische Beschreibung . . . . .	181
A.1.3	Dynamische Beschreibung . . . . .	183
A.2	Berechnung der Durchdringungstiefe . . . . .	183
A.3	Verwendete Software . . . . .	184
A.4	Verwendete Hardware . . . . .	186

# Abkürzungen und Formelzeichen

Hinweis: Aus Gründen der Zweckmäßigkeit und der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle auf die Angabe der deutschen Übersetzung zu den englischen Fachbegriffen und Eigennamen bewusst größtenteils verzichtet. Die Erklärungen zu diesen Begriffen finden sich an den geeigneten Stellen im Text.

Abkürzung	Bedeutung
2-D	zweidimensional
3-D	dreidimensional
6-DOF	6 <u>D</u> egrees of <u>F</u> reedom
AABB	<u>A</u> xis <u>A</u> ligned <u>B</u> ounding <u>B</u> ox
API	<u>A</u> pplication <u>P</u> rogramming <u>I</u> nterface (Programmierschnittstelle)
AR	<u>A</u> ugmented <u>R</u> eality (überlagerte Realität)
BSP	<u>B</u> inary <u>S</u> pace <u>P</u> artitioning (binäres Raumteilungsverfahren)
CAD	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>D</u> esign (rechnergestützte Konstruktion)
CAVE	<u>C</u> ave <u>A</u> utomated <u>V</u> irtual <u>E</u> nvironment
CFM	<u>C</u> onstraint <u>F</u> orce <u>M</u> ixing
CVR	<u>C</u> AVE <u>V</u> irtual <u>R</u> eality
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung e. V.
DIVIPRO	<u>D</u> istributed <u>I</u> nteractive <u>V</u> irtual <u>P</u> ROtotyping
DVR	<u>D</u> esktop <u>V</u> irtual <u>R</u> eality
EMV	<u>e</u> lektromagnetische <u>V</u> erträglichkeit
engl.	englisch
EPA	<u>E</u> xpanding <u>P</u> olytope <u>A</u> lgorithmus
ERP	<u>E</u> rror <u>R</u> eduction <u>P</u> arameter
GJK	<u>G</u> ilbert- <u>J</u> ohnson- <u>K</u> eerthi Algorithmus
GUI	<u>G</u> raphical <u>U</u> ser <u>I</u> nterface (grafische Benutzerschnittstelle)
HFF	<u>H</u> and- <u>F</u> orce- <u>F</u> eedback-System
HFT	<u>H</u> aptic <u>F</u> ingertip
HIP	<u>H</u> aptic <u>I</u> nterface <u>P</u> oint

Abkürzung	Bedeutung
-----------	-----------

HMD	<u>H</u> ead- <u>M</u> ounted- <u>D</u> isplay
HRTF	<u>H</u> ead- <u>R</u> elated- <u>T</u> ransfer- <u>F</u> unction
IHFT	<u>I</u> deal <u>H</u> aptic <u>F</u> ingert <u>i</u> p
IHIP	<u>I</u> deal <u>H</u> aptic <u>I</u> nterface <u>P</u> oint
IMS	<u>I</u> mmersive <u>M</u> ontages <u>i</u> mulation
IS	<u>I</u> deal <u>S</u> tylus
IVPS	<u>I</u> nteractive <u>V</u> irtual <u>P</u> rototyping <u>S</u> ystem
<i>iwb</i>	<u>I</u> nstitut für <u>W</u> erkzeugmaschinen und <u>B</u> etriebswissenschaften der TU München
k. A.	<u>k</u> eine <u>A</u> ngabe
kmU	<u>k</u> leine und <u>m</u> ittelständische <u>U</u> nternehmen
LC	<u>L</u> in- <u>C</u> anney- <u>C</u> losest- <u>F</u> eature- <u>A</u> lgorithmus
LCP	<u>L</u> inear <u>C</u> omplementary <u>P</u> roblem (lineares Komplementaritätsproblem)
LRP	<u>L</u> aboratoire de <u>R</u> obotique de <u>P</u> aris
MAESTRO	<u>M</u> ultimodal <u>I</u> nter <u>a</u> ction Techniques for <u>A</u> ssembly <u>S</u> imulation in <u>V</u> irtual <u>E</u> nvironments
MTM	<u>M</u> ethods of <u>T</u> ime <u>M</u> easurement
NURBS	<u>N</u> on- <u>U</u> niform <u>R</u> ational <u>B</u> - <u>S</u> pline
OBB	<u>O</u> riented <u>B</u> ounding <u>B</u> ox
ODE	<u>O</u> pen <u>D</u> ynamics <u>E</u> ngine
OSG	<u>O</u> pen <u>S</u> cene <u>G</u> raph
PC	<u>P</u> ersonal <u>C</u> omputer
PMV	<u>P</u> rimär <u>m</u> ontage <u>o</u> rgang
REVIMA	<u>V</u> irtual <u>R</u> eality for <u>M</u> aintainability
SDK	<u>S</u> oftware <u>D</u> evelopment <u>K</u> it
SIS	<u>S</u> imulated <u>S</u> tylus
SMV	<u>S</u> ekundär <u>m</u> ontage <u>o</u> rgang
TM	<u>T</u> rademark (Markenname)
UML	<u>U</u> nified <u>M</u> odeling <u>L</u> anguage
USIS	<u>U</u> niversal <u>S</u> imulation <u>S</u> ystem
VADE	<u>V</u> irtual <u>A</u> ssembly <u>D</u> esign <u>E</u> nvironment
VBB	<u>V</u> irtual <u>B</u> uilding <u>B</u> lock
VC	<u>V</u> irtual <u>C</u> oupling (virtuelle Kopplung)
Ve <sup>2</sup>	<u>V</u> irtual <u>E</u> ngineering <u>E</u> nvironment

## Abkürzung      Bedeutung

VEDA	<u>V</u> irtual <u>E</u> nvironment for <u>D</u> esign and <u>A</u> ssembly
VEDAM	<u>V</u> irtual <u>E</u> nvironments for <u>D</u> esign and <u>M</u> anufacturing
VD2	<u>V</u> irtual <u>D</u> esign <u>I</u> I
VDI	<u>V</u> erein <u>D</u> eutscher <u>I</u> ngenieure e. V.
VR	<u>V</u> irtual- <u>R</u> eality (virtuelle Realität)
VRML	<u>V</u> irtual- <u>R</u> eality <u>M</u> odeling <u>L</u> anguage
WIMP	<u>W</u> indows <u>I</u> cons <u>M</u> enu <u>P</u> ointer
XML	<u>E</u> xtensible <u>M</u> arkup <u>L</u> anguage
ZNS	<u>Z</u> entral <u>n</u> ervensystem

## Lateinische      Einheit      Bedeutung Formel- zeichen

<b><i>a</i></b>	m/s <sup>2</sup>	Vektor der Relativbeschleunigung
<b><i>A</i></b>	-	Index für Kollisionsobjekte und Oberflächen
<b><i>A</i></b>	1/kg	Koeffizientenmatrix
<b><i>a<sub>ci</sub></i></b>	-	Oberflächennormale an der Kontaktstelle <i>i</i>
<b><i>b</i></b>	m/s <sup>2</sup>	Vektor der externen Beschleunigung
<b><i>ber</i></b>	-	Index für berechnete Größen
<b><i>b<sub>h</sub></i></b>	Ns/m	Hardwaredämpfung
<b><i>B</i></b>	-	Index für Kollisionsobjekte
<b><i>B<sub>v</sub></i></b>	Ns/m	virtuelle Dämpfung
<b><i>c</i></b>	N	Vektor der äußeren Kraft, die auf einen Körper wirkt
<b><i>C</i></b>	-	Index für Kollisionsobjekte
<b><i>CFM</i></b>	m/Ns	Constraint Force Mixing Parameter
<b><i>e<sub>i</sub><sup>CG</sup></i></b>	-	Einheitskoordinatenachsen des Koordinatensystems eines Fingerglieds des kinematischen Skeletts, mit $i = x, y, z$
<b><i>ERP</i></b>	-	Error Reduction Parameter
<b><i>e<sub>i</sub><sup>sim</sup></i></b>	-	Einheitskoordinatenachsen des Koordinatensystems eines Simulationsobjekts, mit $i = x, y, z$
<b><i>f</i></b>	-	mathematische Funktion
<b><i>f, F</i></b>	N	Kraftvektor

Lateinische Formel- zeichen	Einheit	Bedeutung
$\mathbf{f}_c$	N	Zwangskraft
$\mathbf{f}_{cd}$	N	Kontaktkraft an einem distalen Fingerglied
$\mathbf{f}_{cdz}$	N	z-Komponente der Kontaktkraft $\mathbf{f}_{cd}$
$\mathbf{f}_{ci}$	N	Kontaktkraft an der Kontaktstelle $i$
$\mathbf{f}_{fc}$	N	Zwangskraft, die auf das Gelenk eines Handglieds wirkt
$\mathbf{f}_{si}$	N	Abstoßungskraft an der Kontaktstelle $i$ berechnet durch die geometrische Überschneidung der kollidierenden Körper
$\mathbf{f}_{tc}$	N	Zwangskraft, die sich aus der Verdrehung des Grundgelenks eines Handglieds ergibt
$\mathcal{F}$	N	Gleichgewichtsfunktion
$\mathbf{F}_d$	N	erzeugbare Kraft eines Interaktionsgeräts
$\mathbf{F}_e$	N	auf virtuelle Objekte aufgeprägte Kraft
$\mathbf{F}_f(t_i)$	N	Kraft einer ausgelenkten Feder zum Zeitpunkt $t_i$
$\mathbf{F}_h$	N	Kraft zwischen Mensch und Interaktionsgerät
$\mathbf{F}_m$	N	maximale Haftkraft
$\mathbf{F}_n$	N	Normalkraft
$\mathbf{F}_r$	N	Reibkraft
$\mathbf{F}_t$	N	Tangentialkraft
$\mathbf{F}_{tex}$	N	Kraft aus Texturinformationen
$\mathbf{F}_u$	N	resultierende Ausgabekraft
$\mathbf{F}_{um}$	N	gemittelte resultierende Ausgabekraft
$\mathbf{F}_{umax}$	N	maximale Ausgabekraft
$h$	s	Integratorschrittweite
$i$	-	Index
$\mathbf{I}$	kgm <sup>2</sup>	Trägheitstensor
$\mathbf{I}_d$	kgm <sup>2</sup>	Trägheitstensor eines distalen Fingerglieds
$\mathbf{I}_m$	kgm <sup>2</sup>	Trägheitstensor eines medialen Fingerglieds
$\mathbf{I}_p$	kgm <sup>2</sup>	Trägheitstensor eines proximalen Fingerglieds
$\mathbf{J}$	-	Jakobi-Matrix
$k_d$	Ns/m	translatorische Dämpfung der VC der Fingerglieder
$k_{dpa}$	Ns/m	translatorische Dämpfung der VC der Mittelhand



Lateinische Formel- zeichen	Einheit	Bedeutung
$k_{dt}$	Ns/m	rotatorische Dämpfung der VC der Fingerglieder
$k_{dtpa}$	Ns/m	rotatorische Dämpfung der VC der Mittelhand
$k_s$	N/m	translatorische Federsteifigkeit der VC der Fingerglieder
$k_{spa}$	N/m	translatorische Federsteifigkeit der VC der Mittelhand
$k_{st}$	N/m	rotatorische Federsteifigkeit der VC der Fingerglieder
$k_{stpa}$	N/m	rotatorische Federsteifigkeit der VC der Mittelhand
$K_v$	N/m	virtuelle Federsteifigkeit
$\mathbf{l}_a$	m	Differenzvektor
$\mathbf{L}$	kgm <sup>2</sup> /s	Drehimpuls
$m$	kg	Masse eines Körpers
$m_d$	kg	Masse eines distalen Fingerglieds
$m_m$	kg	Masse eines medialen Fingerglieds
$m_p$	kg	Masse eines proximalen Fingerglieds
$m_{pa}$	kg	Masse der Mittelhand
$mess$	-	Index für gemessene Größen
$\mathbf{M}$	kg	Massenmatrix
$n$	-	Anzahl paarweiser Kollisionstests
$n_c$	-	Anzahl der Kontaktstellen
$\mathbf{n}_K$	-	Oberflächennormale an einem Kontaktpunkt
$O$	-	Ursprung
$O(f(n))$	-	Komplexität eines mathematischen Problems in Abhängigkeit der Funktion f(n)
$\mathbf{p}$	m	Vektor der Durchdringungstiefe
$\mathbf{p}_{AB}$	m	Durchdringungsvektor zweier sich überschneidender Körper $A$ und $B$
$p_K$	m	Position des Kontaktpunkts zweier Körper
$p_{KA}, p_{KB}$	m	Behelfspunkte zur Bestimmung der Durchdringungstiefe zweier Körper $A$ und $B$
$\mathbf{P}$	Ns	Impuls
$\mathbf{q}$	rad	Orientierungsvektor
$\Delta t$	s	Zeitintervall

**Lateinische  
Formel-  
zeichen**

	Einheit	Bedeutung
$\mathbf{R}$	-	Rotationsmatrix
$\mathbf{t}_{fc}$	Nm	Zwangsmoment am Gelenk eines Handglieds
$T$	1/s	Abtastrate
$\mathbf{T}$	Nm	Drehmoment
$U_{max}$	1/s	maximale Update-Rate eines Prozesses in $\text{Ve}^2$
$\mathbf{v}$	m/s	Geschwindigkeitsvektor eines Körpers
$\mathbf{v}_d$	m/s	gemessene Geschwindigkeit an der Koppelstelle Mensch-Interaktionsgerät
$\mathbf{v}_e$	m/s	vom Benutzer auf virtuelle Objekte aufgeprägte Geschwindigkeit
$\mathbf{v}_h$	m/s	Geschwindigkeit an der Koppelstelle Mensch-Interaktionsgerät
$W_{aus}$	Nm	Entspannungsarbeit einer virtuellen Feder
$W_{ein}$	Nm	Spannarbeit einer virtuellen Feder
$\mathbf{x}$	m	Ortsvektor eines Körpers
$\mathbf{x}_a$	m	Abweichung von einer Sollposition
$\Delta\mathbf{x}$	m	Differenzvektor zweier Positionen
$\mathbf{x}_e$	m	Eindringtiefe
$\mathbf{x}_f(t_i)$	m	Ortsvektor des Endpunktes einer ausgelenkten Feder zum Zeitpunkt $t_i$
$\mathbf{X}$	-	Transformationsmatrix

**Griechische  
Formel-  
zeichen**

	Einheit	Bedeutung
$\epsilon_c$	m	kritischer Mindestabstand zweier Körper
$\lambda$	-	Lagrange-Multiplikator
$\mu$	-	Reibkoeffizient
$\varphi$	rad	Winkel
$\omega$	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Kostenverantwortung und Kostenverursachung von Entwicklung, Fertigungs- und Montageplanung im Verhältnis zu der von Fertigung und Montage nach LOTTER (1992, S. 4) . . . . .	2
1.2	Der Anwendungsbereich der manuellen Montage liegt bei reduzierten Losgrößen und reduzierten Investitionskosten bei einer gleichzeitig geforderten hohen Flexibilität (LOTTER ET AL. 1998, S. 3) . . . . .	3
2.1	Einteilung der Grundbewegungen während der manuellen Montage nach dem Methods of Time Measurement (LOTTER ET AL. 1998, S. 14) . . . .	9
2.2	Prinzipielles Vorgehen bei der Montageplanung, zusammengefasst von GRUNWALD (2002, S. 33), basierend auf BULLINGER (1986), SCHUSTER (1992), LOTTER (1992) und KONOLD & REGER (1997) . . . . .	10
2.3	Parallelisierung der Produktionsplanung und damit der Montageplanung mit der Produktentwicklung in den frühen Phasen des Produktlebenszyklus nach GRUNWALD (2002, S. 6) . . . . .	11
2.4	Einsatz von virtuellen Prototypen zur Verkürzung der Produktentwicklung und Produktionsplanung bis zum Produktionsstart nach ZACHMANN (2000, S. 237) . . . . .	13
2.5	Funktionsprinzip und Informationsfluss in einem VR-System . . . . .	18
2.6	Verschiedene Bauformen von Head-Mounted-Displays (HMD) . . . . .	20
2.7	Verschiedene Bauformen von großflächigen Projektionssystemen . . . . .	21
2.8	Verschiedene Bauformen haptischer Geräte, mit denen durch Vibrationen oder Kraftrückkopplung haptische Signale ausgegeben werden können . . .	22
2.9	Darstellungsformen der Informationen und Zuordnung der Planungsaufgaben und Planungswerkzeuge im Verlauf der Montageplanung, basierend auf PATRON (2005, S. 61) . . . . .	24
3.1	Wahrnehmungs- Handlungs-Kreis von STADLER (1997) . . . . .	35
3.2	Griffabelle nach CUTKOSKY & HOWE (1990), ergänzt um aufliegende Kontaktgriffe nach BULLINGER & SOLF (1979, S. 108) . . . . .	38

3.3	Sensorische Substitution: Die Substitutions- und Augmentierungsdisplays sind aufsteigend nach der Dauer der Bearbeitungszeit einer Montageaufgabe angeordnet (DEML 2004, S. 85) . . . . .	39
3.4	Informationsfluss in einem haptischen Regelkreis nach ADAMS ET AL. (1998) im Falle einer Positionsregelung oder mit einer mit Klammern gekennzeichneten Kraftregelung . . . . .	40
3.5	Kraftverlauf und aufgewandte Arbeit während des Kontakts mit einer virtuellen Wand (modelliert durch eine virtuelle Feder) . . . . .	42
3.6	Simulationskreislauf in der Physik-basierten IMS mit kraftrückkoppelnden Eingabegeräten . . . . .	54
3.7	Einteilung der geometrischen Modellbeschreibung, angelehnt an LIN & GOTTSCHALK (1998) mit dem Schwerpunkt auf Beschreibungsformen für VR-Anwendungen . . . . .	56
3.8	Berechnung der Durchdringung $\mathbf{p}$ zweier Polyeder $A$ und $B$ mittels der Minkowski-Differenz $A - B$ (VAN DEN BERGEN 2004, S. 33–38) . . . . .	60
3.9	Kollision eines punktförmigen Avatars mit einem Objekt $A$ und Aufteilung des Avatars in HIP und IHIP nach der Punkt-basierten God-Object-Methode von ZILLES & SALISBURY (1995) . . . . .	65
3.10	Strahl-basiertes haptisches Rendering nach BASDOGAN ET AL. (1997) und HO ET AL. (1997); Verschiebung des IS an die Oberfläche der Objekte in den Teilbildern a bis c; im Falle des gleichzeitigen Kontakts mit mehreren Körpern, siehe Teilbild d . . . . .	66
3.11	Unterschiedliche Ansätze zur Objekt-Objekt-Interaktion nach MCNEELY ET AL. (1999) a, HASEGAWA & SATO (2004) b und JOHNSON & WILLEMSEN (2003) c . . . . .	67
3.12	Kraftkomponenten $\mathbf{F}_n$ , $\mathbf{F}_r$ und $\mathbf{F}_{tex}$ der an den Benutzer zurückgekoppelten Kraft $\mathbf{F}_u$ nach BASDOGAN & SRINIVASAN (2002) . . . . .	68
4.1	Einsatzbereiche der IMS in der Montageplanung . . . . .	78
4.2	Drei Schritte des Simulationsprozesses der IMS mit den jeweiligen Eingangsinformationen und Arbeitsergebnissen . . . . .	80
4.3	Simulationsdurchführung der Grundbewegungen nach MTM in einer IMS . . . . .	82
4.4	Approximation des Kontaktpunktes $p_K$ und des normierten Vektors der Oberflächennormalen $\mathbf{n}_K$ in $\text{Ve}^2$ durch den Vektor der Durchdringungstiefe $\mathbf{p}_{AB}$ mit den Punkten $p_{KA}$ und $p_{KB}$ . . . . .	86
4.5	Annäherung der Geometrie von Fingergliedern durch die Minkowski-Summe $A + B$ eines Geradenstücks $A$ und einer Kugel $B$ zu einem Zylinder mit abgerundeten Enden $C$ . . . . .	89

4.6	VC und haptisches Rendering in $Ve^2$ am Beispiel einer Fingerspitze . . . . .	90
5.1	Grundlegende Softwarepakete und Klassen der Manager-basierten Struktur von $Ve^2$ . . . . .	92
5.2	Beispielhafter Szenegraph in $Ve^2$ mit einem Tisch, einem Zylinder und einer virtuellen Hand . . . . .	95
5.3	Klassendiagramm der in $Ve^2$ implementierten Knoten . . . . .	96
5.4	Komponenten eines Geometrieknotens <i>VeNodeGeom</i> in $Ve^2$ . . . . .	97
5.5	Software-Struktur des Handmodells mit den Handkomponenten und der Verbindung zu den Hardware-Gerätetreibern auf Klassenebene . . . . .	98
5.6	Explosionsdarstellung der Struktur des Handmodells, basierend auf den polygonisierten visuellen Elementen, und als zusammengesetztes Kollisionsmodell, basierend auf den Minkowski-Summen $C$ und $F$ . . . . .	99
5.7	Schematischer Vergleich eines Oberflächenkontaktes mit dem in $Ve^2$ implementierten virtuellen Modell eines distalen Fingerglieds . . . . .	101
5.8	Übergeordneter Systemkreislauf mit der Simulationsreihenfolge in Abhängigkeit der Benutzerinteraktion . . . . .	102
5.9	Schematisches Laufzeitverhalten der Hauptprozesse in $Ve^2$ . . . . .	103
5.10	Aktivitätendiagramm der Synchronisation der visuellen Transformationsmatrizen und der Transformationsmatrizen der Kollisions- und Simulationsobjekte in der Funktion <i>VeNodeGeom::update()</i> . . . . .	105
5.11	Physikalisches Handmodell und die Kopplung der Fingerglieder mit dem kinematischen Skelett der Hand . . . . .	107
5.12	Virtuelles 3-D-Menü von $Ve^2$ . . . . .	110
5.13	Gesamtübersicht über alle Konfigurationsmöglichkeiten von $Ve^2$ . . . . .	111
5.14	Logischer Hardwareaufbau von $Ve^2$ . . . . .	115
5.15	Realer Aufbau zur Anwendung des Gesamtsystems $Ve^2$ für die IMS . . . . .	116
6.1	Ablauf der Anwendungstests von $Ve^2$ . . . . .	118
6.2	Bildfolge a bis e des Kontaktversuchs zur Überprüfung des in $Ve^2$ implementierten haptischen Renderings . . . . .	121
6.3	Verlauf des Kontaktversuchs von jeweils einer Fingerspitze mit einem frei beweglichen Würfel mit den zeitlichen Zuordnungen a bis e zu der in Abbildung 6.2 gezeigten Bildfolge . . . . .	122
6.4	Bildfolge a bis d des Verlaufs des Kontaktgriffs zur Manipulation einer Platte nur mit Hilfe der Fingerspitzen . . . . .	123
6.5	Zeitlicher Verlauf des Kontaktgriffs zur Manipulation einer Platte nur mit Hilfe der Fingerspitzen . . . . .	124

6.6	Bildfolge a bis e des Verlaufs eines zirkularen Präzisionsgriffs am Beispiel eines Würfels . . . . .	126
6.7	Zeitlicher Verlauf eines Präzisionsgriffs am Beispiel eines Würfels . . . . .	127
6.8	Objektmanipulation mit einem prismatischen und einem zirkularen Präzisionsgriff am Beispiel eines Zylinders und einer Kugel als Testkörper . . . . .	128
6.9	Bildfolge a bis e des Verlaufs eines Kraftgriffs, in Kombination mit einem Präzisionsgriff zum gezielten Abstellen des Testobjekts am Beispiel eines Zylinders . . . . .	129
6.10	Zeitlicher Verlauf eines Kraftgriffs, in Kombination mit einem Präzisionsgriff zum gezielten Abstellen des Testobjekts am Beispiel eines Zylinders . . . . .	130
6.11	Ausführung von zirkularen Kraftgriffen anhand eines Würfels (a, b) und einer Kugel (c, d) als Testobjekte . . . . .	131
6.12	Physik-basiertes interaktives Fügen und Trennen einer formschlüssigen Steckverbindung in $Ve^2$ , ohne logische Verbindungsregeln zu erfordern . . . . .	132
6.13	Physik-basiertes interaktives Fügen, Testen und Trennen einer formschlüssigen Drehverbindung in $Ve^2$ . . . . .	134
6.14	Interaktives Fügen einer kraftschlüssigen nicht lösbaren Steckverbindung . . . . .	136
6.15	Schematischer Vorgang beim Fügen nicht lösbarer Verbindungen . . . . .	137
6.16	Einfaches Einlegebeispiel mit insgesamt vier dynamischen Objekten . . . . .	138
6.17	Erfasste Messwerte bezüglich der Anzahl der auftretenden Kontakte und der Ausführungsgeschwindigkeit der zwei Hauptprozesse sowie der auftretenden Fingerkräfte von Daumen, Zeigefinger, Mittelfinger, Ringfinger und kleinem Finger während der Objektmanipulation im Rahmen eines einfachen Einlegebeispiels mit insgesamt vier dynamischen Objekten . . . . .	140
6.18	Vorteile für Benutzer, die durch den Einsatz von VR gesehen werden. Das Ergebnis basiert auf der Befragung von 25 Anwendern durch KLOCKE & STRAUBE (2004) . . . . .	142
A.1	Für $Ve^2$ verwendete Elemente eines UML-Klassendiagramms zur Darstellung von Softwarepaketen . . . . .	181
A.2	Für $Ve^2$ verwendete Elemente eines UML-Klassendiagramms zur Darstellung der Beziehungen zwischen Klassen . . . . .	182
A.3	Für $Ve^2$ verwendete Elemente eines UML-Aktivitätendiagramms . . . . .	183

# Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung I des Standes der Technik. Einstufung der Bewertungskriterien: ● erfüllt, ● teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt, ∅ keine Angaben . . .	27
2.2	Zusammenfassung II des Standes der Technik. Einstufung der Bewertungskriterien: ● erfüllt, ● teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt, ∅ keine Angaben . . .	28
3.1	Aufstellung der Ansätze zur direkten Handinteraktion; Einstufung der Kriterien: ● erfüllt, ● teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt, ∅ keine Angaben . . . .	48
3.2	Eigenschaften der untersuchten Sensorhandschuhe . . . . .	50
3.3	Eigenschaften tragbarer haptischer Handinteraktionsgeräte . . . . .	51
3.4	Eigenschaften bodengebundener haptischer Handinteraktionsgeräte . . . .	53
6.1	Allgemeine Parameter für die Versuchsanwendungen und Systemtests . . .	120
A.1	Für die Entwicklung von Ve <sup>2</sup> verwendete Software . . . . .	184
A.2	Für die Umsetzung von Ve <sup>2</sup> verwendete und getestete Hardware . . . . .	186





# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Technische Innovationen werden allgemein als Schlüsselfaktoren für nachhaltiges wirtschaftliches Wachstum und gesellschaftlichen Wohlstand angesehen. Daraus ergibt sich als eine der zentralen Herausforderungen, der sich produzierende Unternehmen stellen müssen, die schnelle Umsetzung der technischen Innovationen in marktfähige Produkte.

Neben technischen Innovationen bietet ein hoher Grad an Produktindividualisierung den Unternehmen die Möglichkeit, sich von ihren Bewerbern erkennbar abzusetzen, um erfolgreich auf dem Markt zu bestehen (REINHART & ZÄH 2003). Damit einher geht die stetig steigende Funktionalität von Produkten wie z. B. bei modernen Autos, die neben den grundlegenden Funktionen der Fortbewegung und des Transports noch weitere Funktionen wie den aktiven Insassenschutz, die Navigationsunterstützung und Multimediafunktionalitäten bieten. So steigen marktbedingt die Komplexität der Produkte und damit eng verknüpft die Komplexität des gesamten Produktentstehungsprozesses (GRUNWALD 2002, S. 14–16).

Hinsichtlich der marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen agieren die heutigen Unternehmen in einem dynamischen und von hohem Konkurrenzdruck bestimmten globalisierten Umfeld. Flexibilität und Reaktionsfähigkeit sind gefordert, um den daraus erwachsenden Anforderungen begegnen zu können (REINHART 2000). So müssen produzierende Unternehmen nicht nur auf komplexe Produkte mit großer Spezifität, Variantenvielfalt und dadurch geringeren Losgrößen, sondern auch auf kurze Produktlebenszyklen eingestellt sein.

In diesem Zusammenhang kommt im Produktentstehungsprozess der Montage als einem entscheidenden Kostenfaktor eine wichtige Rolle zu. Abbildung 1.1 zeigt die prozentualen Anteile der Produktentstehungsphasen an Kostenverantwortung und Kostenverursachung: Während der Hauptteil der Kostenverantwortung in der Entwicklung und in der Fertigungs- und der Montageplanung zu finden ist, liegt ein Großteil der Kostenverursachung in der Montage. Diesen Zusammenhang bestätigen Analysen der Herstellkosten industriell gefertigter Produkte. Diese zeigen, dass der Kostenanteil der Montage, je nach

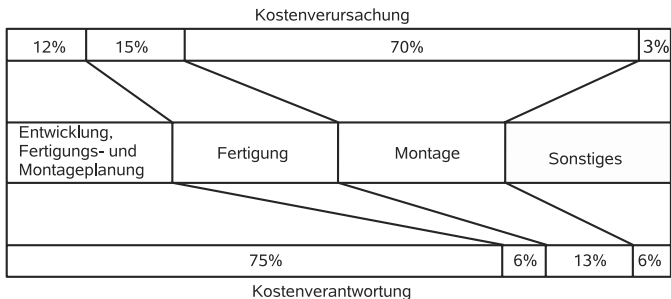


Abbildung 1.1: Kostenverantwortung und Kostenverursachung von Entwicklung, Fertigungs- und Montageplanung im Verhältnis zu der von Fertigung und Montage nach LOTTER (1992, S. 4)

Branche oder Produkt, zwischen 20 % und 70 % liegt (LOTTER 2004, S. 358). Kosteneinsparungen in der Montage tragen somit wesentlich zu einer kosteneffizienten Produktion bei.

Je nach Produkt und den daraus abgeleiteten Produktionserfordernissen kann dabei, wie in Abbildung 1.2 dargestellt, eine automatisierte oder eine manuelle Montage vorteilhafter sein. Bei hohen Stückzahlen und eingeschränkter Flexibilität können automatisierte Verfahren effizient eingesetzt werden. Steigt jedoch die geforderte Flexibilität in der Montage bei gleichzeitig geringen Stückzahlen, so wird vermehrt an die manuelle Montage zurückgegriffen. Um bei der manuellen Montage ein Optimum an Produktivität und Qualität zu erreichen, müssen allerdings die Betriebsmittel und die Prozesse entsprechend auf die Bedürfnisse der Mitarbeiter angepasst sein, da die individuelle Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter eine entscheidende Rolle spielt. Dementsprechend sind für einen schnellen Produktionsanlauf und für den reibungslosen Produktionsbetrieb eine detaillierte Planung und die simulative Absicherung manueller Montageprozesse sehr wichtige Schritte in der Produktionsplanung.

Darüber hinaus ist eine enge Verzahnung von Entwicklung und Produktionsplanung unbedingt erforderlich. Nur so sind bei einer steigenden Variantenzahl und Produktkomplexität die gleichzeitig geforderte Reduktion der Produktionskosten und die Verkürzung der Entwicklungszyklen möglich. Im Idealfall startet die Planung eines Montagesystems bereits in der Frühphase der Produktentwicklung. Sie wird parallel zur Spezifikation der Produkteigenschaften weitergeführt und angepasst (FRANKE 2003, S. 1). Die Planungs- und Entwicklungsprozesse können durch die heute schon eingesetzten entsprechenden Me-

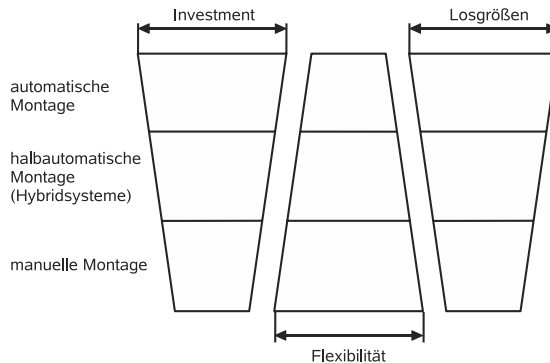


Abbildung 1.2: Der Anwendungsbereich der manuellen Montage liegt bei reduzierten Losgrößen und reduzierten Investitionskosten bei einer gleichzeitig geforderten hohen Flexibilität (LOTTER ET AL. 1998, S. 3)

thoden und die jeweils darauf abgestimmten Werkzeuge verbessert und verkürzt werden. Ganzheitliche Methodenansätze, die die Vernetzung in den Vordergrund rücken, sind Simultaneous Engineering oder Concurrent Engineering (EHRENSPIEL 2003, S. 202–211). Diese Methoden setzen alle eine starke Rechnerunterstützung und einen reibungslosen Datenaustausch der beteiligten Bearbeiter und Rechnerwerkzeuge voraus.

Im Besonderen ist in den letzten Jahren deutlich geworden, dass sich ohne 3-D-Modelle keine konkurrenzfähige Entwicklung mehr realisieren lässt und dass auch die rechner-technische Abbildung der Produktion im Vorfeld der realen Produktion nicht außer Acht gelassen werden darf. Die Digitale Fabrik (BIERSCHENK ET AL. 2005, S. 8), die Virtuelle Fabrik (WESTKÄMPER 2003, S. 48) und die Virtuelle Produktion (REINHART ET AL. 1999) sind dabei die Überbegriffe, mit denen der rechnergestützte Produktionsprozess beschrieben wird.

Vor allem im Bereich der Produktions- und Montageplanung für automatisierte Prozesse wurden Rechnerwerkzeuge entwickelt, die eine Beschleunigung und qualitative Verbesserung der Planungsprozesse zur Folge haben. Allerdings steht dem gegenüber eine noch unbefriedigende Situation hinsichtlich Simulationswerkzeugen, die manuelle Montageprozesse abbilden können. So werden trotz der Fülle an potentiell zur Verfügung stehenden Rechnerwerkzeugen gemäß einer Studie im Umfeld von kleinen und mittelständischen Unternehmen (kmU) (BIERSCHENK ET AL. 2005, S. 34) nur 38 % der Arbeitsplätze mit Hilfe von digitalen Werkzeugen geplant. 62 % der befragten Unternehmen gaben an, ei-

ne detaillierte räumliche und ergonomische Ausgestaltung manueller Arbeitsschritte nur auf Expertenwissen basierend zu gestalten und diese im laufenden Betrieb nachträglich zu optimieren. Eine der Hauptursachen ist der hohe Aufwand. Er beträgt für eine 3-D-Simulation in der Produktionsplanung für die Modellerstellung und Validierung bis zu 80 % der Gesamtzeit. Nur 20 % verbleiben für Experimente und Analysen. Ein weiteres bedeutendes Problem ist die noch unzureichende Benutzerfreundlichkeit bestehender Rechnerwerkzeuge (WENDEROTH 2002), was den Bedienungsaufwand zusätzlich erhöht. Durch den mangelnden Einsatz an Simulationswerkzeugen ist eine systematische Produktgestaltung in Kombination mit der Produktionsplanung für eine manuellen Montage erschwert. Optimierungspotentiale werden nicht voll ausgeschöpft und unerkannte Probleme und Fehler in der Planungsphase müssen nachträglich mit einem erhöhten Aufwand in der realen Produktion nachgebessert werden.

Das im Folgenden beschriebene Forschungsziel dieser Arbeit leitet sich demnach aus dem Bedarf nach einem Rechnerwerkzeug für die simulative Absicherung manueller Montageprozesse ab, das den Modellerstellungs- und Vorbereitungsaufwand reduziert und dessen Anwendung intuitiv möglich ist. Virtual-Reality (VR) zur Visualisierung und zur Realisierung einer benutzerfreundlichen Interaktion, basierend auf einem physikalischen, realitätsnahen Verhalten der virtuellen Montageobjekte, bietet sich hierfür als grundlegende zu untersuchende Technologie für die Konzeption und Umsetzung eines derartigen Rechnerwerkzeugs an.

## 1.2 Forschungsziel

Die Zielsetzung dieser Arbeit kann in drei Teilgebiete untergliedert werden:

- Montagesimulation,
- Interaktion und Objektverhalten,
- Systemdesign und Implementierung.

Aus Sicht der *Montagesimulation* ist es das Ziel, ein effizientes Simulationswerkzeug zu entwickeln, mit dem manuelle Montageprozesse realitätsnah abgebildet und somit schnell und intuitiv verifiziert werden können. Damit soll einerseits die Möglichkeit geschaffen werden, die prinzipielle Montierbarkeit unabhängig von dem später in der Produktion eingesetzten manuellen oder automatisierten Montageverfahren zu überprüfen. Andererseits sollen die Erstellung und die Verifizierung der Montagereihenfolge sowie die Optimierung der manuellen wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Abläufe zur Analyse von manuellen Montagearbeitsplätzen interaktiv ermöglicht werden.

Hinsichtlich *Interaktion und Objektverhalten* ist das Forschungsziel, eine intuitive und realitätsnahe Interaktion mit den zu manipulierenden und zu montierenden Objekten zu ermöglichen. Dies setzt den Einsatz von geeigneten Eingabegeräten zur Feinmanipulation voraus. Die Hand des Simulationsanwenders soll komplett in der virtuellen Umgebung repräsentiert werden, um den vollen Nutzen aus der damit verbundenen motorischen Leistungsfähigkeit des Menschen zu ziehen. Die virtuelle Umgebung muss sich dabei qualitativ nach Physik-basierten Gesetzmäßigkeiten verhalten. Die Aussagekraft der Simulation wird dadurch vergrößert; dem planenden Ingenieur und den Fachkräften aus der Montagepraxis wird ein leichter Systemzugang ermöglicht. Dies beinhaltet die plausible Darstellung von Gravitation, Trägheit und Reibkontakten.

Aus der Perspektive *Systemdesign und Implementierung* ist das Entwicklungsziel die technische Umsetzung eines interaktiven Echtzeitsystems, genannt Virtual Engineering Environment (Ve<sup>2</sup>), das eine Physik-basierte Simulation und die haptische Interaktion ermöglicht. Die Machbarkeit mit den heute verfügbaren Hard- und Softwarekomponenten der Computertechnik steht im Mittelpunkt und soll anhand der durchgeführten Arbeiten hergeleitet und belegt werden.

## 1.3 Vorgehensweise und Gliederung

Um die gesetzten Ziele zu erreichen, gliedert sich die gewählte Vorgehensweise in folgende Kapitel:

Beginnend mit *Kapitel 2* werden die grundlegenden Begriffe der Montage und der Montageplanung geklärt und die Besonderheiten der manuellen Montage erläutert. Darüber hinaus werden in einem allgemeinen Kontext die Möglichkeiten vorgestellt, die Montageplanung durch Rechnerwerkzeuge zu unterstützen. Insbesondere werden der VR-Einsatz in der Montagesimulation und die Integration der Technologie in den übergeordneten Montageplanungsprozess beschrieben. Anhand der bekannten Ansätze werden die bestehenden Defizite des VR-Einsatzes herausgearbeitet und der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit aufgezeigt.

Anschließend werden in *Kapitel 3* die grundlegenden Bestandteile eines VR-Systems und die zu berücksichtigenden Aspekte hinsichtlich der Benutzerinteraktion vorgestellt. Der spezielle Entwicklungsstand der entscheidenden Hardware- und Softwarekomponenten wird in diesem Zusammenhang aufgezeigt. Es werden Interaktionsstrategien, Handeingabegeräte und Algorithmen zur Kollisionserkennung und für die Physiksimulation vorgestellt und hinsichtlich des Einsatzes in einem System zur virtuellen Montagesimulation diskutiert und bewertet.

Aufbauend auf *Kapitel 2* und *3* werden in *Kapitel 4* die technischen und methodischen Anforderungen für das zu entwickelnde VR-System  $\text{Ve}^2$  aufgestellt, um die Software- und Hardwareanforderungen festzulegen. Ein eigenes Konzept zur Integration des Rechnerwerkzeugs in den Montageplanungsprozess wird vorgestellt. Zudem werden die einzelnen technischen Konzepte beschrieben, mit denen die zentralen Funktionalitäten von  $\text{Ve}^2$  realisiert werden.

In *Kapitel 5* werden die Struktur und die konkrete technische Umsetzung von  $\text{Ve}^2$  erläutert. Dieses Kapitel untergliedert sich in folgende Schwerpunkte: Systemarchitektur, Systemabläufe und Systemkonfiguration. In dem Abschnitt *Systemarchitektur* wird die grundlegende Datenstruktur des Systems und seiner Komponenten erläutert. Der Abschnitt *Systemabläufe* beschreibt die zur Berechnung und Visualisierung voneinander abhängigen parallelen und hintereinander geschalteten Berechnungsprozesse. Abschließend wird die *Systemkonfiguration* dargestellt.

*Kapitel 6* beinhaltet die Anwendung von  $\text{Ve}^2$ , demonstriert anhand von unterschiedlichen Fallbeispielen zur Simulation von Handhabungs- und Fügevorgängen; technische und wirtschaftliche Betrachtungen für den heutigen und den zukünftigen praktischen Einsatz dieser Technologie werden angestellt.

In *Kapitel 7* werden die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst; Anknüpfungspunkte für eine nachhaltige Weiterentwicklung der Forschungsarbeiten sowie Perspektiven für einen Transfer der Technologie und der entwickelten Simulationsumgebung in die Industrie werden angesprochen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Inhalt des Kapitels

Nach der Darstellung der allgemeinen Situation für produzierende Unternehmen und den sich daraus ergebenden Forschungszielen in Kapitel 1 werden in diesem Kapitel die grundlegenden Begriffe der Montage und der Montageplanung geklärt und die Besonderheiten der manuellen Montage erläutert. Nach einer übergeordneten Beschreibung des Rechnerinsatzes zur Planungsunterstützung wird insbesondere VR im Rahmen der Montageplanung und der Montagesimulation beschrieben. Hierbei wird die Integration der Technologie in den übergeordneten Planungsprozess und im Zusammenspiel mit weiteren Rechnerwerkzeugen zur Planungsunterstützung dargestellt. Anhand der bestehenden Ansätze werden die Defizite herausgearbeitet und der konkrete Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit aufgezeigt.

### 2.2 Montageplanung

#### 2.2.1 Begriffsbestimmung

In der Wertschöpfungskette kommt der *Montage* eine besondere Bedeutung im Produktionsprozess zu. Aufgrund der Stellung der Montage am Ende des Produktionsablaufes kumulieren sich hier alle in früheren Planungs- und Produktionsschritten begangenen unentdeckten Fehler. Eine sorgfältige Planung, eine montagegerechte Produktgestaltung sowie eine fehlertolerante Montagesystemgestaltung sind von entsprechender Bedeutung für eine qualitativ hochwertige und wirtschaftlich rentable Produktion. Die Montage wird dabei folgendermaßen definiert: Nach VDI 2815 (1978, Blatt 1, S. 3) ist *Montage* der „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der Fertigung“. Der Montageprozess setzt sich dabei aus mehreren verschiedenen Vorgängen zusammen, wobei die wesentlichen Tätigkeiten einerseits die Handhabung der zu montierenden Körper und andererseits die unterschiedlichen Fügevorgänge sind. Die VDI-Norm VDI 2860 (1990, S. 2) definiert *Handhaben* als „das Schaffen definierter Veränderungen oder vorübergehende Aufrechterhaltung einer vorgegebenen

räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem“. Die Fertigungsverfahren *Fügen* werden nach DIN 8593-0 (2003) in neun Teile untergliedert. Dabei ist die Unterscheidung zwischen *Fügen* und *Montieren* von Bedeutung, denn „Fügen ist nicht mit Montieren gleichzusetzen. Montieren wird zwar stets unter Anwendung von Fügeverfahren durchgeführt, es schließt jedoch zusätzlich alle Handhabungs- und Hilfsvorgänge einschließlich des Messens und Prüfens mit ein“ (DIN 8593-0 2003, S. 2). Die für diese Arbeit relevanten Teile sind Zusammensetzen (Teil 1) und An- und Einpressen (Teil 3). *Zusammensetzen* ist definiert als „Fügen, bei dem der Zusammenhalt der Füge Teile durch Schwerkraft (Reibung), Formschluss, Federkraft oder eine Kombination davon bewirkt wird“ (DIN 8593-1 2003). *An- und Einpressen* ist definiert als „eine Sammelbenennung für die Verfahren, bei denen beim Fügen die Füge Teile sowie etwaige Hilfsfüge Teile im Wesentlichen nur elastisch verformt werden und ungewolltes Lösen durch Kraftschluss verhindert wird“ (DIN 8593-3 2003).

Hinsichtlich einer wirtschaftlichen Betrachtung lassen sich Montagevorgänge in *Primärmontagevorgänge* (PMV) und *Sekundärmontagevorgänge* (SMV) unterteilen (LOTTER 1992, S. 67). Unter PMV sind alle Vorgänge einzuordnen, die der Wertschöpfung eines Produktes während seines Montagevorganges dienen, also alle Aufwendungen an Zeit, Energie, Informationen und Teilen zur Vervollständigung eines Produktes. Unter SMV sind hingegen alle Vorgänge zu verstehen, die auf Grund des gewählten Montageprinzips die notwendigen sekundären Aufwendungen an Zeit, Informationen und Energie darstellen, ohne eine Wertschöpfung des Produktes zu bewirken. Beispiele sind Weitertransportieren, Wenden, Ablegen, Neugreifen, zu große Greifwege und Körperbewegungen. Das Ziel der Montageplanung ist es, die nicht wertschöpfenden Tätigkeiten soweit wie möglich zu reduzieren und die PMV bestmöglich zu optimieren. Die Ausgangsbasis für die Feinanalyse nach PMV und SMV zur Planung und Analyse von Einzelmontagearbeitsplätzen sind die Grundbewegungen nach Methods of Time Measurement (MTM), dargestellt in Abbildung 2.1.

### 2.2.2 Planungsprozess

Aus der Planungsperspektive betrachtet, stellt die Planung von Montagesystemen und Montageprozessen Teilschritte in der Fabrikplanung dar. Die *Fabrikplanung* wird nach (AGGTELEKY 1987, S. 33) in die drei Phasen Vorarbeiten, Projektstudie und Ausführungsplanung gegliedert. Die *Montageplanung* ist Bestandteil der Ausführungsplanung, an deren Ende der Betriebsbeginn steht (FRANKE 2003, S. 27). Die Montageplanung hat die Aufgabe, ausgehend von einem Montageproblem, ein System zu entwickeln, mit dem es unter den gegebenen Bedingungen möglich ist, Einzelteile oder Baugruppen zusam-



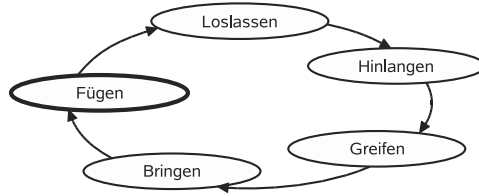


Abbildung 2.1: Einteilung der Grundbewegungen während der manuellen Montage nach dem Methods of Time Measurement (LOTTER ET AL. 1998, S. 14)

menzufügen (SCHÄFER 1992, S. 10). Eine effiziente Montageplanung bedarf einer engen Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung sowie mit einer Vielzahl von weiteren Unternehmensbereichen wie z. B. Vertrieb, Personalwesen und Controlling. Außerdem ist der Verbund mit externen Zulieferern zu berücksichtigen. Die Montageplanung ist daher über „ein kompliziertes Netz von Informationsflüssen in ihr Umfeld eingebunden“ (FELDMANN 1997, S. 6).

GRUNWALD (2002, S. 11) definiert unter Einbeziehung der Normen VDI 2815 (1978) und DIN 8593-0 (2003) die Begriffe *Montageplanung*, *Montageablauf* und *Montagevorgang* folgendermaßen: „Die Montageplanung hat die Aufgabe, Montageanlagen und Montageabläufe zu entwerfen, mit denen der Zusammenbau von Teilen oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen möglich ist. Der Montageablauf wird dabei als Gesamtheit einzelner Montagevorgänge zur Erfüllung der Montageaufgabe verstanden. Montagevorgänge können Füge- und Handhabungsvorgänge, Hilfs- und Kontrolliervorgänge sein“.

Da eine eindeutig definierte Struktur der Montageplanung nicht existiert, weisen die am meisten verbreiteten Ansätze wie beispielsweise die von BULLINGER (1986), SCHIMKE (1991), LOTTER (1992), FELDMANN (1997) und GRUNWALD (2002) im Detail Unterschiede auf. Eine gemeinsame übergeordnete Struktur im Ablauf und der zeitlichen Anordnung der Planungsaufgaben lässt sich dennoch feststellen. Abbildung 2.2 zeigt den Ablauf der Montageplanung in einer mehrstufigen Vorgehensweise aus Konzeption und Produktanalyse, Grob- und Feinplanung sowie Ausarbeitung und Realisierung.

Die Phase 1 der *Konzeption* und *Produktanalyse* beinhaltet die Formulierung der Ausgangssituation, der Produktmerkmale und der Produktionsdaten sowie das Ermitteln der Planungsziele (LOTTER (1992, S. 360 ff.); BULLINGER (1986, S. 59 ff.)).

Die Phasen 2 bis 5 umfassen die Grob- und Feinplanung des *Montageablaufs* und den *Montagesystementwurf*. Diese Planungsphasen haben die Struktur des Montageablaufs

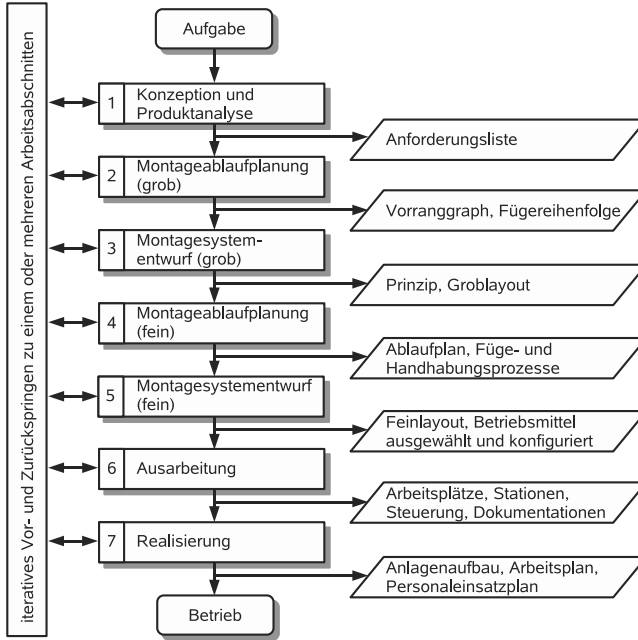


Abbildung 2.2: Prinzipielles Vorgehen bei der Montageplanung, zusammengefasst von GRUNWALD (2002, S. 33), basierend auf BULLINGER (1986), SCHUSTER (1992), LOTTER (1992) und KONOLD & REGER (1997)

(BULLINGER 1986, S. 53) mit dem Entwurf des Montagevorranggraphs (KONOLD & REGER 1997, S. 29) und der Festlegung der Fügereihenfolge zum Ergebnis. Auch die Planung des Montagelayouts mit der Zielsetzung einer sinnvollen räumlichen Anordnung (ROSSGODERER 2002, S. 62) und der Sicherstellung eines günstigen Werkstückflusses und einer optimalen Materialbereitstellung (LOTTER 1992, S. 376) ist eine der wichtigen Aufgaben dieser Planungsphasen. Zudem werden Betriebsmittel für die manuellen bzw. (teil-)automatisierten Arbeitsstationen zusammengestellt. Des Weiteren ist in der Feinplanung die Optimierung hinsichtlich der PMV und der SMV durchzuführen (LOTTER 1992, S. 71 ff.). Hierbei sind bei manuellen Arbeitsstationen auch ergonomische Aufgabenstellungen hinsichtlich minimaler Greifwege, Griffgünstigkeit und Erreichbarkeit (BULLINGER 1986, S. 260) zu lösen.

Das Ziel der darauffolgenden Phasen 6 und 7 der *Ausarbeitung* und der *Realisierung* ist die Erstellung aller Unterlagen und Programme zur Durchführung der Montage (JONAS

2000, S. 19) sowie die technische Umsetzung der Anlage.

Die einzelnen Phasen werden iterativ mehrfach durchlaufen, da die Zwischenergebnisse der einzelnen Planungsschritte oft Änderungen in den Vorgaben aus dem vorangehenden Schritt erzwingen. Dies gilt um so mehr, je stärker die Parallelisierung von Produktentwicklung und Produktionsplanung ausgeprägt ist (siehe Abbildung 2.3). Änderungen am Produkt, insbesondere neu hinzukommende Varianten, wirken sich häufig direkt auf die Planungsgrundlagen aus und ziehen somit einen kompletten Neudurchlauf des Planungszyklus nach sich (FRANKE 2003, S. 30).

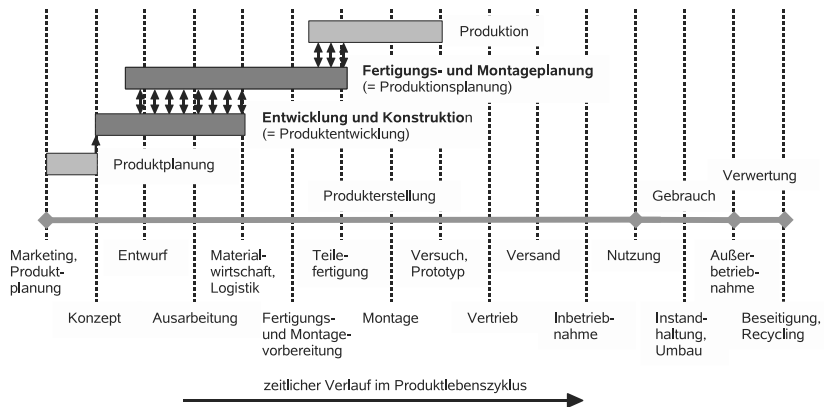


Abbildung 2.3: Parallelisierung der Produktionsplanung und damit der Montageplanung mit der Produktentwicklung in den frühen Phasen des Produktlebenszyklus nach GRUNWALD (2002, S. 6)

### 2.2.3 Manuelle Montage

Das bisher beschriebene prinzipielle Vorgehen umfasst verallgemeinert sowohl die notwendigen Schritte für die integrierte Planung einer automatisierten Montageanlage als auch für die Planung manueller Montagearbeitsplätze. Die Besonderheiten der *manuellen Montage* sind noch zu erläutern.

„Wie das Wort *manuell* (lat.: manus = Hand) besagt, werden bei der manuellen Montage die Montagevorgänge vom Menschen ausgeführt. Hier steht der Mensch wie bei kaum einem anderen Fertigungsprozess im Mittelpunkt. Durch den Einsatz seiner Hände, seiner Fingerfertigkeit, seiner Sinnesorgane und seiner Intelligenz führt er unter Inanspruchnahme

me von Hilfsmitteln wie Werkzeugen, Vorrichtungen und Lehren die Montagevorgänge aus“ (LOTTER 1992, S. 43). Der Arbeitsplatz, an dem die Montagevorgänge verrichtet werden, wird als *Handarbeitsplatz* bezeichnet. Dieser ist nach VDI 2815 (1978, Blatt 6, S. 2) definiert als „Arbeitsplatz, an dem überwiegend in Handarbeit gefertigt wird. Von allgemeinem Handwerkszeug und kleinen Hilfsvorrichtungen abgesehen, werden keine besonderen Hilfsmittel benötigt“.

Im Unterschied zur automatisierten Montage müssen bei der Gestaltung der Handarbeitsplätze nicht nur die optimalen Abläufe und Montagereihenfolgen definiert, sondern auch die Ergonomie des Arbeitsplatzes mit berücksichtigt werden. Die *Arbeitsplatzgestaltung* ist dabei definiert als „die maßliche und kräftebezogene Anpassung von Arbeitsplatzkomponenten an den Menschen unter besonderer Einbeziehung der Wirkräume sowie des Sehbereichs“ (BRAUN & KEMPF 2002, S. 25). Dies beinhaltet die Analyse von Greifräumen, Hebelasten, Körperhaltungen, Sichtfeldern und Bewegungen, um schädigende statische und dynamische Belastungen zu vermeiden. Konventionelle Beurteilungskriterien zur ergonomischen Bewertung von manuellen Montagearbeitsplätzen sind in den VDI-Normen VDI 3657 (1993) und VDI 4006 (2002) aufgeführt.

Auch aus wirtschaftlicher Sicht ist die Ergonomie des Arbeitsplatzes ein nicht zu vernachlässigender Faktor, da in die Berechnung der Personalkosten für manuelle Arbeitsplätze die erforderliche Montagezeit einfließt. Diese hängt langfristig u. a. von der Ergonomie des Arbeitsplatzes und somit auch von der funktionalen Eigenschaft des Montagesystems ab. Aus rechtlicher Sicht ist zur Erhaltung der menschlichen Arbeitsleistung „das Gestalten der Arbeitsbedingungen gemäß arbeitswissenschaftlichen Grundsätzen nicht nur notwendig, sondern eine Verpflichtung, die auch im Betriebsverfassungsgesetz verankert ist“ (LOTTER 1992, S. 43). Weitere wichtige Anforderungen für eine wirtschaftliche manuelle Montage sind u. a. die Umrüsfähigkeit, die Nachrüsfähigkeit mit Automatisierungskomponenten, die Verkettung zur Fließmontage und die Bereitstellung einer Vielzahl von Einzelteilen. Diese müssen dabei nicht generell erfüllt werden, sondern sind im Einzelfall an die betrieblichen Bedingungen anzupassen (LOTTER & SCHILLING 1994, S. 121 f.).

### 2.2.4 Rechnerunterstützung

Um die Vielfalt und Komplexität der Anforderungen bei der Montageplanung, die auf kurze Planungszyklen ausgelegt ist, beherrschen zu können, ist heute eine weitreichende Rechnerunterstützung notwendig. Eine der jeweiligen Aufgabe entsprechende Modellbildung und die Simulation des Montagevorgangs mit unterschiedlichen Parametern sind dafür Grundvoraussetzungen. Die Definition eines *Modells* ist nach DIN 19226-1 (1994): „Ein Modell ist die Abbildung eines Systems oder Prozesses in ein anderes begriffliches

oder gegenständliches System, das aufgrund der Anwendung bekannter Gesetzmäßigkeiten, einer Identifikation oder auch getroffener Annahmen gewonnen wird und das System oder den Prozess bezüglich ausgewählter Fragestellungen hinreichend genau abbildet“. Unter *Simulation* versteht man gemäß der Definition VDI 3633 (1993, Blatt 1, S. 3): „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“. Die rechnergestützten Simulations- und Planungswerkzeuge ermöglichen es, in kurzer Zeit und zu einem frühen Zeitpunkt in der Produktentwicklung Produkt- und Produktionsalternativen zu entwickeln und zu bewerten. Durch den Einsatz dreidimensionaler digitaler Modelle, sog. virtueller Prototypen, gelingt es im Gegensatz zu teuren und zeitaufwändigen physikalischen Prototypen, die Iterationszyklen zu verkürzen. Dies wiederum stellt ein wesentliches Kriterium für eine effizientere Gestaltung des integrierten Produktentwicklungs- und Produktionsplanungsprozesses dar. Ein schnellerer Produktionsstart und damit eine schnellere Markteinführung werden so ermöglicht (siehe Abbildung 2.4).

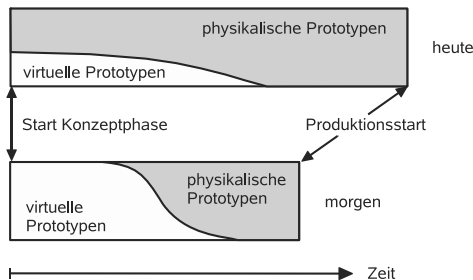


Abbildung 2.4: Einsatz von virtuellen Prototypen zur Verkürzung der Produktentwicklung und Produktionsplanung bis zum Produktionsstart nach ZACHMANN (2000, S. 237)

Das große Potenzial der rechnergestützten Planungswerkzeuge zeigt sich auch in der Vielfalt der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten unter den Stichwörtern *Digitale Fabrik* und *Virtuelle Produktion*. Deren gemeinsames Ziel ist es, die Produktion komplett im Rechner abzubilden, um Neu- und Umplanung zu beschleunigen und um die Planungssicherheit zu erhöhen. Eine mögliche Definitionen der *Digitalen Fabrik* gibt z. B. WESTKÄMPER (2003, S. 48), der die Digitale Fabrik als „statisches Abbild der realen Fabrik, der Fabrikstrukturen und der mobilen und stationären Einrichtungen in digitaler Form im Rechner“ und als Datenbank-orientiert beschreibt. Ergänzend definieren BIERSENK

ET AL. (2005, S. 8): „Die Digitale Fabrik ermöglicht die Virtuelle Produktion des virtuellen Produktes. Die Realisierung erfolgt erst nach vollständiger digitaler Absicherung“. Im Gegensatz zur Digitalen Fabrik definiert WESTKÄMPER (2003, S. 48) die *Virtuelle Fabrik* als statisches und dynamisches Modell einer Fabrik, ihres potentiellen Layouts, ihrer Einrichtungen, ihrer Abläufe und ihrer Prozesse und beschreibt sie als Ablauf-orientiert. Im Unterschied dazu definieren REINHART ET AL. (1999) die *Virtuelle Produktion* als „die durchgängige Planung, Validierung und Steuerung von Produktionsprozessen und Produktionsanlagen mit Hilfe digitaler Modelle“. Der vorrangige Handlungsbedarf in diesem gesamten Themenfeld liegt in der Weiterqualifikation der Planungswerkzeuge und Simulationsverfahren auf allen Ebenen (Fabrik-, Anlagen- und Detailplanung) und in der Systemintegration. Eine Übersicht über den sehr umfassenden Themenkomplex und über die in diesem Rahmen gültigen Begriffsbestimmungen geben z. B. REINHART ET AL. (1999), FRANKE (2003), BIERSENK ET AL. (2005), PATRON (2005) oder FUSCH (2005). Gemäß einer Umfrage bezüglich des Einsatzes der Digitalen Fabrik in kmUs wird der Nutzen vor allem in den Bereichen Montageplanung, Fertigungsplanung, Materialflussplanung und Layoutplanung als groß bis sehr groß eingeschätzt (BIERSENK ET AL. 2005, S. 23). Aktuelle Fortschritte bei der Einführung und Umsetzung der Digitalen Fabrik beschreiben z. B. ZÄH ET AL. (2005), POTINECKE & SLAMA (2005) und GRAUPNER & BIERSENK (2005).

Die zur konkreten Umsetzung der Virtuellen Produktion zur Verfügung stehenden Rechnerwerkzeuge lassen sich anhand des Einsatzzwecks in vier grundlegende Anwendungsbereiche gliedern. So können die entwickelten rechnergestützten Verfahren in Modellierungs-, Bewertungs-, Analyse- und integrative Verfahren eingeteilt werden (HEGER 1998, S. 34). Rechnerwerkzeuge mit dem speziellen Fokus auf der Montageplanung lassen sich nach LOTTER & SCHILLING (1994, S. 220) in folgende Anwendungen weiter unterscheiden:

- Montageplanerstellungs- und -verwaltungssysteme,
- Auswahl- bzw. Beratungsprogramme, z. B. zum Sichern montagegerechter Konstruktionen oder zur bestmöglichen Auswahl von Betriebsmitteln bzw. Systemelementen,
- CAD-ähnliche Programme mit erweitertem Funktionsumfang, z. B. zur Layouterstellung für manuelle und/oder automatisierte Montagesysteme,
- Softwarelösungen zur Programmierung flexibel automatisierter Montagesysteme,
- Berechnungs- und Simulationsprogramme,
- Schulungsprogramme,

- Programme zu Marketingzwecken.

Aus dem Bereich der Berechnungs- und Simulationsprogramme spielen aufgrund der Komplexität der zu lösenden Aufgaben für den Bearbeiter die Darstellung und Simulation räumlicher und zeitlicher Zusammenhänge bei der Montageplanung und Montageoptimierung anhand digitaler 3-D-Modelle eine sehr bedeutende Rolle. In diesem Rahmen wurde der Begriff der *virtuellen Montage* geprägt. Nach CONNACHER ET AL. (1995, S. 8) versteht man – frei übersetzt – unter virtueller Montage, „die Anwendung von Computer-Werkzeugen, um montagerelevante Entscheidungen durch Analysen, Modellbildung, Visualisierung und Darstellung der zugrunde liegenden Daten zu treffen oder zu unterstützen, ohne eine physikalische Umsetzung des Produkts oder der zugrundeliegenden Prozesse“. Die für die virtuelle Montage eingesetzten Rechnerwerkzeuge sind 3-D-Simulationssysteme, Augmented-Reality-(AR)-Systeme und VR-Systeme. Für die Simulation menschlicher Bewegungen und Abläufe stehen virtuelle Menschmodelle zur Verfügung, die in die jeweiligen Systeme integriert werden können.

3-D-Simulationssysteme gelten dabei als Standardrechnerwerkzeuge, wenn es um die dreidimensionale Visualisierung und Simulation von komplexen Produktionsabläufen geht. Die Systeme sind weit verbreitet, befinden sich auf einem systemtechnisch hohen Entwicklungsstand und sind als Desktop-Anwendungen für den Entwickler leicht zugänglich. Aus technischer Sicht bedeutet dies, dass die Visualisierung und die Interaktion mit herkömmlichen PCs mit Monitor, Maus und Tastatur realisiert werden. Vom Einsatzgebiet her sind sie trotz Teilfunktionalitäten für manuelle Abläufe stark auf die Planung und Optimierung automatisierter Abläufe zugeschnitten. Um den Simulationsaufwand zu reduzieren, tendiert nach ROSSGODERER (2002, S. 41) die Entwicklung marktüblicher 3-D-Simulationssysteme zunehmend dazu, Algorithmen zur Automatisierung von Planungsaufgaben zu verwenden. Zur Systemklasse der 3-D-Simulationssysteme findet sich eine Übersicht in KUGELMANN (1999, S. 6 ff.). Die Systeme sind nach ROSSGODERER (2002, S. 24) seit geraumer Zeit am Markt etabliert und nicht mehr wesentlicher Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

Zusätzlich zu den beschriebenen etablierten 3-D-Simulationssystemen wird versucht, AR-Systeme für die Montageplanung und für die Unterstützung der Montage in der Produktion einzusetzen. Dabei werden real vorhandene Produktprototypen oder Produktionssysteme mit zusätzlichen digitalen Informationen bzw. Objekten ergänzt. Die Visualisierung der virtuellen Objekte wird meist mittels eines Head-Mounted-Displays (HMD) realisiert. Hinsichtlich der Interaktion mit AR-Systemen entsprechen Zeiger-basierte Interaktionsgeräte, 3-D-Markierungen oder Sprachsteuerungen dem heutigen Stand der Interaktionstechnik. Im Gegensatz zu 3-D-Simulationssystemen und VR-Systemen, die mit rein virtuellen Objekten arbeiten, werden AR-Systeme erst ab einem Zeitpunkt der Produktent-

wicklung bzw. Produktionsplanung eingesetzt, zu dem schon reale Anschauungsobjekte existieren. AR-Systeme im Bereich der Montageplanung beschreiben z. B. EVERSHEIM ET AL. (2001), ALT (2003), DOIL ET AL. (2003), GAUSEMEIER ET AL. (2002) und RAGHAVAN ET AL. (1999). Für eine detaillierte Übersicht über die wichtigsten bestehenden Ansätze sei auf PATRON (2005, S. 32-40) verwiesen.

VR-Systeme werden seit Mitte der 90er Jahre für Design- und Ergonomiestudien sowie für die Simulation von Montagevorgängen zu Trainingszwecken hilfreich eingesetzt (WEIDLICH ET AL. 2006). Im Rahmen dieser Arbeit werden im Folgenden VR-Systeme, die für eine intuitive Interaktion und für eine realitätsnahe Darstellung der virtuellen Prototypen und der virtuellen Montagesituation besonders gut geeignet sind, näher betrachtet und deren Zusammenwirken mit den restlichen Rechnerwerkzeugen während des Planungsprozesses beschrieben.

## 2.3 Virtual-Reality in der Montageplanung

### 2.3.1 Begriffsbestimmung

Einer der Ersten, der die *Virtuelle Realität* bzw. im üblichen Sprachgebrauch engl. *Virtual-Reality* (VR) in einer Vision in Bezug auf Interaktion und Visualisierung vorstellte, war SUTHERLAND (1965). Seitdem wurde in vielen unterschiedlichen Varianten versucht den Begriff VR präzise festzulegen. So definieren z. B. BURDEA & COIFFET (1994, S. 4) VR durch drei Is: Immersion, Interaktion, Imagination. Der Begriff *Imagination* wird dabei sehr nahe an dem Begriff *Simulation* verwendet. Eine spätere Definition von BURDEA & COIFFET (2003, S. 3) lautet in der deutschen Übersetzung: „Die Virtuelle Realität ist eine High-End-Benutzerschnittstelle, die die Echtzeitsimulation und die Interaktion über verschiedene sensorische Kanäle mit einbezieht. Die sensorischen Modalitäten umfassen visuelle, akustische und taktile Wahrnehmungen sowie Geruchs- und Geschmackswahrnehmungen“.<sup>1</sup> Im Unterschied dazu definieren MANETTA & BLADE (1995) – frei in das Deutsche übersetzt – „[...] VR als ein Computersystem zur Erzeugung einer künstlichen Welt. Der Benutzer erhält den Eindruck, sich in ihr aufzuhalten; außerdem besitzt er die Fähigkeit zu navigieren und Objekte zu manipulieren“.<sup>2</sup> ZACHMANN (2000, S. 2) bestimmt VR über vier Hauptaspekte: Echtzeit-Interaktion, Echtzeit-Simulation, Immersion

---

<sup>1</sup>engl. Originaldefinition: „Virtual-Reality is a high-end-computer interface that involves realtime simulation and interaction through multiple sensorial channels. These sensorial modalities are visual, auditory, tactile, smell and taste“.

<sup>2</sup>engl. Originaldefinition: „A computer system used to create an artificial world in which the user has the impression of being in the world and with the ability to navigate through the world and manipulate objects in the world“.



und direkte Interaktion mit neuartigen Eingabegeräten. Unter *Immersion* wird dabei nach (BAUER 1997, S. 55) der psychische Zustand verstanden, der dem Benutzer das Empfinden vermittelt, er sei ein Teil der virtuellen Welt. Dieser Zustand kann verschieden stark ausgeprägt sein, was als Grad der Immersion bezeichnet wird.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Definition bezeichnet zusammengefasst *VR-Systeme* als Systeme, die einen Menschen in eine dynamische, computergenerierte Umgebung versetzen. Diese Systeme müssen dabei die drei Hauptmerkmale von VR (Immersion, Echtzeit-Interaktion und Echtzeit-Simulation) aufweisen. Darauf aufbauend ist die Definition des Begriffs der *immersiven Montagesimulation* (IMS) von der Definition des Begriffs der virtuellen Montage (siehe Abschnitt 2.2.4) abgeleitet. Als IMS wird im Rahmen dieser Arbeit die Durchführung einer virtuellen Montage mit einem VR-System, das die drei Hauptmerkmale von VR erfüllt, bezeichnet.

### 2.3.2 Funktionsprinzip

Den vorangegangenen Definitionen folgend, besteht die Aufgabe eines VR-Systems darin, digitale 3-D-Informationen visuell ansprechend darzustellen, eine intuitive echtzeitfähige Interaktion zu ermöglichen und der jeweiligen Anwendung entsprechend das Objektverhalten realitätsnah abzubilden. Dem Anwender wird dadurch ein sehr direkter Zugang zu den digitalen Informationen ermöglicht. Dieser direkte Zugang setzt bei dem Anwender ein wesentlich geringeres Abstraktionsvermögen voraus, als dies bei herkömmlichen Rechnerwerkzeugen der Fall ist. Die Aufgabenstellung lässt sich dadurch schneller begreifen und der Benutzer kann seine Aufmerksamkeit in verstärktem Maße der eigentlichen Problemlösung widmen. WANN & MON-WILLIAMS (1996, S. 845) beschreiben das Ziel von VR zusammenfassend als „[...] das Ziel, virtuelle Umgebungen so zu schaffen, dass der Lernaufwand für ihre Bedienung minimal, aber der durch sie erhaltene Informationsgehalt maximal ist“.<sup>3</sup>

Um den gewünschten immersiven Eindruck eines VR-Systems zu erzeugen, müssen mehr Informationen zwischen dem Anwender und dem System ausgetauscht werden, als dies bei einer Standard-Desktoplösung der Fall ist. Die Interaktion und der damit verbundene prinzipielle Informationskreislauf zwischen Benutzer und System verlaufen wie in Abbildung 2.5 veranschaulicht.

Ausgehend von einem initialen Systemzustand erhält der Benutzer bestimmte visuelle, akustische oder haptische Informationen durch entsprechende Medien. Der Anwender kann nun entsprechend seines Vorhabens auf diese Informationen reagieren. Um das Grundprin-

---

<sup>3</sup>engl. Originaltext: „[...] the goal is to build (virtual) environments that minimize the learning required to operate within them, but maximize the information yield“.

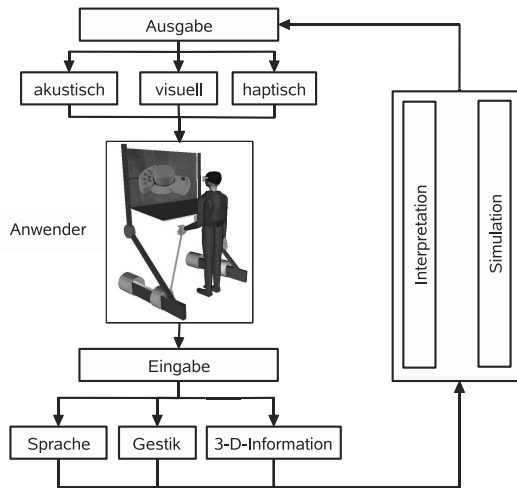


Abbildung 2.5: Funktionsprinzip und Informationsfluss in einem VR-System

zip der echtzeitfähigen realitätsnahen Interaktion zu gewährleisten, müssen die Benutzerreaktionen und die Benutzerbefehle über geeignete Interaktionsmechanismen in das System wieder zurückgeführt werden. Positionserfassungsgeräte ermöglichen die räumliche Erfassung der 3-D-Bewegungen und sind optimalerweise tragbar oder schränken den Anwender in seinem Bewegungsumfang nur sehr wenig ein, was durch einen großen Arbeitsraum gewährleistet werden kann. Die Eingabe konkreter Benutzerbefehle ist durch eine akustische Interaktion wie z. B. über eine Spracheingabe genauso möglich wie über visuelle Verfahren zur Gestenerkennung oder über optische Markierungen.

Die so erzeugten oder formulierten Befehle bzw. Positionsänderungen werden daraufhin vom System interpretiert. Ein neuer Systemzustand ist die Folge. Parallel zur Systembeeinflussung durch den Anwender kann durch Simulationsroutinen Physik-basiertes Objektverhalten oder speziell definiertes Objektverhalten in Echtzeit generiert und in den Informationsfluss eingespeist werden. Die sich daraus ergebenden Effekte werden wieder an den Benutzer zurückgeführt, wodurch sich der Informationskreislauf schließt.

### 2.3.3 Interaktionsgeräte

Um den in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Informationsfluss technisch umsetzen zu können, sind neben den zugrundeliegenden leistungsfähigen Rechneinheiten weitere Hard-

warekomponenten zur Interaktion notwendig. Die Einteilung der Hardwarekomponenten erfolgt in Ausgabegeräte und Eingabegeräte.

### **Ausgabegeräte**

Die zur Verfügung stehenden Ausgabegeräte lassen sich in

- Visualisierungsgeräte,
- akustische Ausgabegeräte und
- haptische Interaktionsgeräte

einteilen.

Da Menschen den weitaus größten Teil der Informationen über ihre Umwelt mit den Augen wahrnehmen, spielen besonders Visualisierungsgeräte eine sehr wichtige Rolle in Bezug auf den Immersionsgrad eines VR-Systems. Je realitätsnäher die Darstellung ist und je besser das Sichtfeld abgedeckt werden kann, wobei die Störeinflüsse der Umgebung verringert werden, desto leichter fällt es dem Anwender, sich als Teil der virtuellen Welt zu begreifen. Stereoskopische Darstellungen, je nach Anwendung als wahlweise aktive oder passive Verfahren, verbessern nochmals durch die erzeugte Tiefenwirkung den immersiven Eindruck. Da die Visualisierung eine so bedeutende Stellung im VR-Bereich einnimmt, steht eine große Bandbreite von verschiedenen Geräten zur Verfügung. Es lassen sich dabei Visualisierungsgeräte für eine Person, wie z. B. ein HMD oder ein Monitor, von Visualisierungsgeräten für mehrere Personen, wie großflächige Bildschirme oder Projektionen, unterscheiden. Darüber hinaus ist auch die Kombination von 2-D-Visualisierungsgeräten mit großflächigen Projektionen möglich (NEUGEBAUER ET AL. 2007).

Das besondere Merkmal von HMDs (Abbildung 2.6) ist, dass sich die Bildquelle direkt vor dem Auge des Anwenders befindet und über eine tragbare Vorrichtung am Kopf fixiert wird. Hierdurch bleibt die Bildquelle auch bei Bewegungen des Kopfes im Sichtfeld des Anwenders. Diese Art von Display steht jeweils nur einem Anwender zur Verfügung. Die grundsätzlich verschiedenen Bauformen von HMDs sind: monokular, biokular monoskopisch, biokular stereoskopisch oder binokular (PATRON 2005, S. 26).

Für die gleichzeitige Visualisierung für mehrere Anwender werden großflächige Projektionen verwendet. Dabei kann die Projektionsfläche sphärisch, zylindrisch, eben, L-förmig oder würfelförmig mit bis zu sechs Seiten ausgeprägt sein, siehe auch Abbildung 2.7. Würfelförmige Projektionsflächen umschließen den Benutzer vollständig und werden daher auch als CAVE (Computer Automated Virtual Environment) bezeichnet.



ProView XL40/50 STm  
Kaiser Electro Optics  
Quelle: VR-Logic



Datavisor HiRes  
n-vision Inc.  
Quelle: ivwb



Visette 45 SXGA  
CYBERMIND  
Quelle: Cybermind

Abbildung 2.6: Verschiedene Bauformen von Head-Mounted-Displays (HMD)

Die Definition für akustische Ausgabegeräte ist nach BURDEA & COIFFET (2003, S. 84) in der deutschen Übersetzung: „Akustische Ausgabegeräte sind Computerschnittstellen, die künstlich erzeugte akustische Informationen, basierend auf der Interaktion mit der virtuellen Welt, an den Benutzer zurückkoppeln. Die Geräusche können dabei monoaural (beide Ohren hören das selbe Geräusch) oder binaural (jedes Ohr hört ein unterschiedliches Geräusch) sein.<sup>4</sup> Akustische Ausgaben sind eine wichtige Zusatzinformation, die den Realitätsgehalt eines immersiven Systems weiter steigern und die sogar geeignet sind, andere Sinneswahrnehmungen wie z. B. fehlende haptische Informationen teilweise zu ersetzen (PETZOLD ET AL. 2004). Die akustischen Signale können über Lautsprechersysteme oder Kopfhörer ausgegeben werden. Die dreidimensionale Darstellung der akustischen Signale spielt dabei eine große Rolle, da dadurch der Anwender die Möglichkeit hat, die Signale räumlich zuzuordnen und diese mit den anderen Informationen des VR-Systems in Bezug zu setzen. Mit modernen PC-Soundkarten können akustische Signale mittels vorgepeicherter Head-Related-Transfer-Functions (HRTF) dreidimensional umgesetzt werden (BURDEA & COIFFET 2003, S. 91).

Neben visuellen und akustischen Reizen spielen auch taktile und kinästhetische Sinneswahrnehmungen für Menschen eine wichtige Rolle, um Informationen über die Umwelt zu sammeln. CHARWAT (1994, S. 428) definiert Taktilität sowohl als das Tasten selbst als auch als den Tastsinn (Hautsinn). Die Kinästhesie ist nach CHARWAT (1994, S. 237) die Selbstwahrnehmung (Propriozeption), die einer Person ihre eigene Körperbewegung gewahr werden lässt. Haptik (griechisch: greifbar) wird im Deutschen mit der Bedeutung „den Tastsinn betreffend“ benutzt und dient hier als Oberbegriff für Kinästhesie, Pro-

---

<sup>4</sup>engl. Originaldefinition: „Sound displays are computer interfaces that provide synthetic sound feedback to users interaction with the virtual world. The sound can be monoaural (both ears hear the same sound) or binaural (each ear hears a different sound)“.

CAVE  
(würfelförmig)  
Quelle: RWTH-Aachen



Holobench  
(L-förmig)  
Quelle: iwv



VisionDome  
(sphärisch)  
Quelle: Elumens



Powerwall  
(eben)  
Quelle: ICIDO



Abbildung 2.7: Verschiedene Bauformen von großflächigen Projektionssystemen

priozeption und Taktilität. Spezielle Ausgabegeräte (siehe Abbildung 2.8) ermöglichen es, haptische Informationen für den Anwender in Form von Vibrationen oder in Form von Kräften und Momenten darzustellen. Geräte, die Vibrationen zurückkoppeln, sind z. B. das Logitech® Dual Action™ Gamepad (LOGITECH 2006) oder der Datenhandschuh CyberTouch™ (IMMERSION 2006). Das Gamepad wurde speziell für Computerspiele entwickelt und kann nur als gesamtes Gerät vibrieren. Der Datenhandschuh kann im Gegensatz dazu die Vibrationseinheiten an den fünf Fingerspitzen getrennt ansteuern. Geräte, mit denen Kräfte erzeugt werden können, sind z. B. der HapticMASTER™ (FCS ROBOTICS 2005) mit drei Bewegungsfreiheitsgraden und drei Kraftfreiheitsgraden. Das PHANTOM™ (SENSABLE 2005) ist mit sechs Bewegungsfreiheitsgraden und je nach Bauform mit drei Kraftfreiheitsgraden und mit bis zu drei Momentenfreiheitsgraden ausgestattet. Der Datenhandschuh CyberGrasp™ (IMMERSION 2006) verfügt über 22 Bewegungsfreiheitsgrade und fünf Kraftfreiheitsgrade. Neben BURDEA & COIFFET (1996) und BURDEA (1999) geben ZÄH ET AL. (2002) eine gute Übersicht über haptische Interaktionsgeräte und sie spezifizieren technische, ergonomische und wirtschaftliche Bewertungsgrößen, nach denen potentielle Nutzer das für sie am besten zugeschnittene Gerät bewerten und auswählen können.

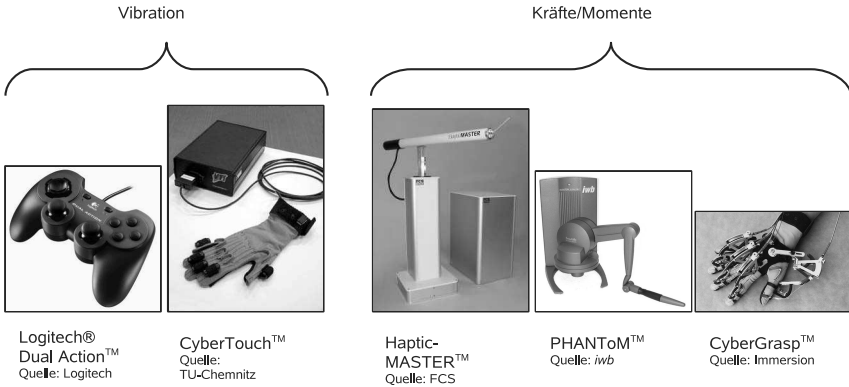


Abbildung 2.8: Verschiedene Bauformen haptischer Geräte, mit denen durch Vibrationen oder Kraftrückkopplung haptische Signale ausgegeben werden können

## Eingabegeräte

Die für ein immersives VR-System prinzipiell möglichen Eingabemechanismen lassen sich wie folgt unterteilen:

- Positionserfassungsgeräte,
- Gestenerkennung und
- Spracherkennung.

Die Positionserfassungsgeräte dienen in VR-Anwendungen gemäß FOXLIN (2002, S. 164) zur Erfassung der räumlichen Position des Anwenders und der Ausrichtung des Kopfes (Headtracking), der Gliedmaßen oder auch von in der Hand gehaltenen Objekten zum Zweck der Interaktion mit 3-D computergenerierten Displays oder Teleoperatoren. Des Weiteren werden Positionserfassungsgeräte im Speziellen für die Detektion der Blickrichtung, zur Objektselektion und -manipulation, zur Navigation und zur Animation virtueller Menschmodelle eingesetzt. In der technischen Umsetzung existieren dazu Positionserfassungssysteme, die auf verschiedenen physikalischen Funktionsprinzipien beruhen. Beispiele hierfür sind magnetische Systeme, mechanische Systeme, akustische Systeme, optische Systeme oder auch gekoppelte Systeme, die zusätzlich Trägheitseffekte ausnutzen. Eine sehr umfassende Darstellung des Standes der Technik im Bereich der Positionserfassung und eine Diskussion über Vor- und Nachteile der jeweiligen technischen Ausführung wie

z. B. Wiederholraten, die erreichbare Genauigkeit, Verdeckungsprobleme und Messabweichungen durch Feldverzerrungen geben BURDEA & COIFFET (2003, S. 17–41) sowie ROLLAND ET AL. (2001).

Von traditionellen Eingabegeräten wie Maus, Tastatur oder auch SpaceMouse<sup>®</sup> ausgehend, wurde schnell erkannt, dass durch diese Art der Benutzereingabe die menschliche Hand in ihrem Aktionsraum stark eingeschränkt wird und dadurch auch die Interaktionsmöglichkeiten in virtuellen Umgebungen limitiert sind. Eingabegeräte zur Gestenerkennung sind aus diesem Grund so gestaltet, dass der verfügbare Arbeitsbereich der Hand eine gewisse dreidimensionale Ausdehnung besitzt und der Benutzer seine Hand und die einzelnen Finger frei in diesem Bereich bewegen kann. Dabei werden die Positionen und Stellungen der einzelnen Fingerglieder, teilweise auch die Stellung des Handgelenks, gemessen und die gesamte Handhaltung als Geste interpretiert. Bei den meisten heute verwendeten Eingabegeräten zur Gestenerkennung handelt es sich um Sensorhandschuhe, die teilweise schon fest mit einem räumlichen Positionserfassungssystem verbunden sind. Die Hauptunterscheidungsmerkmale sind dabei die Sensoranzahl, die Messgenauigkeit, die Abtastrate der eingesetzten Sensoren sowie die verschiedenen Messverfahren, die z. B. auf optischen oder widerstandsabhängigen Messprinzipien basieren. Beispiele für Sensorhandschuhe zur Gestenerkennung sind z. B. der Pinch<sup>®</sup> Glove (FAKESPACE 2006), der 5DT Data Glove (FIFTHDIMENSION 2006) oder der CyberGlove<sup>®</sup> II (IMMERSION 2006). Eingabegeräte zur Gestenerkennung geben dem Benutzer keine fühlbare Rückkopplung. Die Benutzerführung beim Einsatz derartiger Geräte findet daher ausschließlich über akustische oder visuelle Signale statt. Die unterschiedlichen Gesten zur Bedienung des Systems müssen dem Benutzer bekannt sein, da es sich dabei um vordefinierte Regeln handelt, die sich dem Bediener nicht intuitiv erschließen.

Eine sehr effiziente Art, Informationen zwischen Menschen auszutauschen, ist die menschliche Sprache. Zudem eröffnet die Nutzung der verbalen Kommunikation einen neuen Kommunikationskanal. Da für diese Art der Kommunikation die Hände nicht benötigt werden, stehen diese für andere Aufgaben zur Verfügung. Dieses Kommunikationsprinzip auch bei Mensch-Maschine-Schnittstellen zu verwenden, ist schon seit längerem Gegenstand der Forschung (MAKHOUL & SCHWARTZ 1995). Trotz einiger Fortschritte in diesem Bereich ist es immer noch sehr schwierig, natürliche Sprache für eine exakte Steuerung von VR-Systemen einzusetzen. Umgebungsgeräusche oder Wortbruchstücke, die fälschlicherweise vom Spracherkennungssystem als Befehle interpretiert werden, erschweren eine intuitive und präzise Bedienung. Zudem muss der Bediener prinzipbedingt bei Spracheingabegeräten eine Vielzahl an Befehlen auswendig beherrschen, was eine intuitive Handhabung von VR-Systemen mittels Sprachsteuerung zum jetzigen Stand der Technik zusätzlich erschwert.

### 2.3.4 Einordnung in den rechnergestützten Planungsprozess

Wie in den Abschnitten 2.3.1 bis 2.3.3 beschrieben, besteht der Vorteil von VR-Systemen gegenüber anderen Rechnerwerkzeugen in der realitätsnahen Darstellung der virtuellen Szene und einer realitätsnahen Benutzerinteraktion. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, die virtuelle Montage in der virtuellen Umgebung als IMS intuitiv nachzustellen und die prinzipielle Montierbarkeit und die Montageabläufe zu verifizieren.

Im Verlauf der Montageplanung und der stetigen Verfeinerung und Konkretisierung der Ergebnisse (siehe Abbildung 2.2) müssen jedoch entsprechend den Anforderungen an einen effizienten Planungsprozess, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, verschiedene, aufeinander abgestimmte Rechnerwerkzeuge zum Einsatz kommen. Abbildung 2.9 zeigt die methodische Einordnung des VR-Einsatzes mit den weiteren im Montageplanungsprozess eingesetzten Rechnerwerkzeugen.

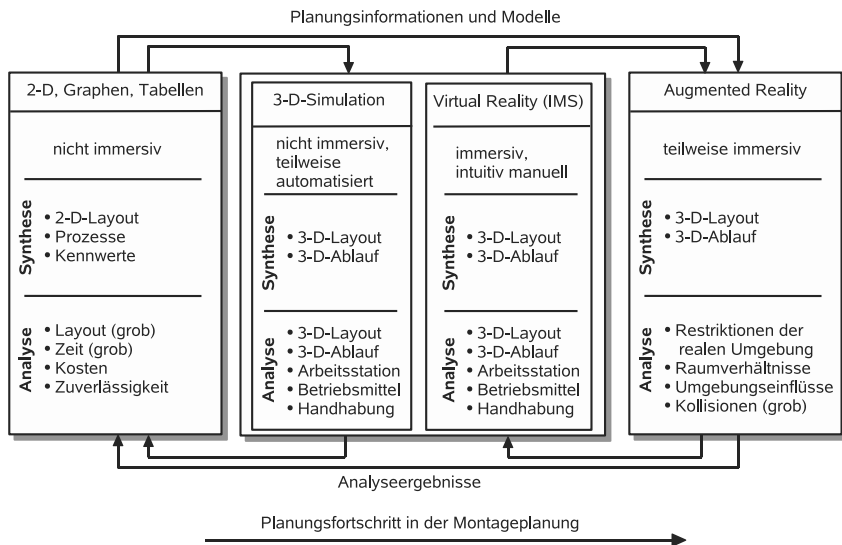


Abbildung 2.9: Darstellungsformen der Informationen und Zuordnung der Planungsaufgaben und Planungswerkzeuge im Verlauf der Montageplanung, basierend auf PATRON (2005, S. 61)

So liegen die Vorteile einer tabellarischen Darstellungsweise bzw. die Vorteile von Rechnerwerkzeugen zur zweidimensionalen geometrischen oder logischen Prozessbeschreibung vor



allem in den frühen Planungsphasen. Außerdem lassen sich Kennwerte und Kriterien, die sich nicht räumlich geometrisch abbilden lassen, bearbeiten. Diese sind wichtige Eingangsinformationen für die weiterführende, nicht-immersive 3-D-Simulation, die vorzugsweise für die Planung automatisierter Montageanlagen eingesetzt wird. Ebenso liefern sie aber auch Informationen für die IMS. Diese ist durch ihren intuitiven immersiven Charakter besonders gut geeignet, um mit ihr kurzfristige Analysen durchzuführen und Fragestellungen, die unmittelbar den Menschen im Produktionsprozess betreffen, zu beantworten. Stehen schon teilweise reale Prototypen bzw. die reale Produktionsumgebung zur Verfügung, so ist der Einsatz der AR-Technologie in Betracht zu ziehen, um den Abgleich mit und die Übertragung der digitalen Modelle in die reale Umgebung zu verbessern. Die durch die 3-D-Simulation und den VR- bzw. AR-Einsatz erarbeiteten Ergebnisse werden im Anschluss an die jeweils durchgeführte Aufgabe wieder in die vorgelagerten Planungswerkzeuge übertragen. Sie dienen als Basis für die nächste Ausarbeitungsstufe.

### **2.3.5 Bestehende Ansätze**

Im Folgenden werden die aus der Literatur bekannten Ansätze von VR-Systemen mit dem Anwendungsschwerpunkt auf der Montagesimulation aufgezeigt und bewertet. Die Besonderheit von VR-Systemen, die speziell für eine IMS ausgelegt sind, besteht darin, dass neben einer realitätsnahen Visualisierung und Interaktion auch Fügevorgänge wie Zusammensetzen oder Verschrauben in Echtzeit dargestellt werden müssen. Unabhängig von der Art der Benutzerinteraktion werden für die Durchführung der Fügeoperationen zwei verschiedene Lösungsstrategien angewendet: entweder Wissens-/Regel-basiert oder Physik-basiert. Diese können unabhängig voneinander, aber auch in Kombination miteinander zur virtuellen Montagesimulation eingesetzt werden.

Wissens- und Regel-basierte Ansätze beruhen auf vorab definierten Montageregeln, die festlegen, welche Fügestellen auf welche Art und Weise miteinander verbunden werden können. Die speziell pro Fügestelle definierten Randbedingungen werden während der Simulation laufend mit dem aktuellen Systemzustand abgeglichen. Werden z. B. geometrische Randbedingungen derart erfüllt, dass zwei Fügepartner sich unter einem definierten Mindestabstand und/oder Winkel zueinander befinden, so treten Regeln in Kraft, die die Freiheitsgrade des Benutzers so einschränken, dass die beiden Objekte – manuell definiert – positioniert werden können oder dass sog. Snapping-Algorithmen die Objekte automatisch platzieren. Um den Aufwand der vorbereitenden Definition der Montageregeln zu verringern, wird versucht, Informationen über die Lage und die Beschaffenheit der Verbindung aus den CAD-Daten in die VR-Modelle automatisiert zu übernehmen. Allerdings sind die meisten bekannten Lösungsansätze noch auf eine weitgehend manuelle

Konfiguration der Randbedingungen angewiesen.

Physik-basierte Ansätze verzichten demgegenüber auf vorab festgelegte logische Regeln und berechnen das Objektverhalten während der Montage ausschließlich über die physikalischen Zusammenhänge wie Gravitation, Masse, Trägheit und Kontaktbedingungen. Im Falle eines Fügevorgangs sind somit allein die Oberflächen der VR-Modelle als virtuelle Fügepartner entscheidend. Da in den meisten Fällen CAD-Systeme als Datenquelle für die virtuellen Montageobjekte dienen und da die Oberflächenbeschaffenheit der VR-Modelle maßgeblich durch den Export der CAD-Daten in VR-Modelle bestimmt wird, ist dies bei der späteren Physik-basierten virtuellen Montagesimulation mit zu berücksichtigen.

Weitere wichtige Unterscheidungsmerkmale von VR-Systemen in diesem Aufgabenfeld sind die Art der visuellen Darstellung, die Rückkopplung von akustischen und/oder haptischen Signalen, die Interaktionsformen mittels Sprache und Gestik oder die direkte Interaktion mit der Hand. Die Auswahl an virtuellen Werkzeugen und Montagehilfsmitteln, die zur realitätsnahen Durchführung der Montageaufgabe oder zur Erleichterung der Interaktion in der virtuellen Umgebung zur Verfügung stehen, ist ebenfalls ein wichtiges Unterscheidungskriterium.

Zusammengefasst stellt sich der untersuchte Stand der Technik für Systeme zur virtuellen Montagesimulation folgendermaßen dar (Tab. 2.1 und Tab. 2.2): Insgesamt wurden im Rahmen der betrachteten Quellen 26 verschiedene repräsentative Lösungsansätze, die in 20 unterschiedlichen Systemen implementiert sind, untersucht. Im Hinblick auf die zugrundeliegende Logik verfolgt die deutliche Mehrheit der Lösungsansätze ein rein Wissens-/Regel-basiertes Systemverhalten. Etwa ein Viertel der Ansätze unterstützt einen gemischten Wissens-/Regel-basierten und Physik-basierten Ansatz und nur drei aller untersuchten Ansätze setzen ein rein Physik-basiertes Objektverhalten zur virtuellen Montagesimulation ein.

Bezogen auf die Interaktionsmöglichkeiten sind die untersuchten Systemansätze sehr heterogen, wobei knapp zwei Drittel trotz immersiver Interaktionsmechanismen (Sprache, Gestik, Datenhandschuh) einen Cursor als Manipulator in der virtuellen Umgebung nutzen. Nur ungefähr ein Drittel der untersuchten Systeme erlaubt die direkte Interaktion mit der Hand, wobei nur ein System die Feinmanipulation gegriffener virtueller Objekte grundsätzlich ermöglicht. Dies ist jedoch aufgrund mangelnder Stabilität des Greifvorgangs nicht anhand von Versuchen belegt. Trotz potentieller Vorteile gegenüber einer einhändigen Interaktion unterstützt nur etwa ein Drittel der Systeme explizit eine beidhändige Systembedienung und Objektmanipulation. Der funktionale Einsatz bzw. die Andeutung eines Werkzeugeinsatzes mittels virtueller Werkzeuge ist ebenfalls nur in einem geringen Anteil der Simulationssysteme realisiert. So unterstützen nur sechs Systeme die Darstellung virtueller Werkzeuge, wie z. B. virtuelle Schraubendreher, Hammer oder Bohrschrauber.

Systeme/Quellen	Anwendung Konstruktion Montagesimulation Ergonomieanalyse	Logik Wissens-/Regel-basiert Physik-basiert	Interaktion Sprache Gestik Cursor Hand (direkt) einhändig/beidhändig virt. Werkzeuge	Ausgabe Großprojektion HMD Monitor akust. Rückkopplung hapt. Rückkopplung
<b>CODY</b>				
JUNG ET AL. (1998), JUNG & WACHSMUTH (1998)	○ ● ○	● ○	● ● ● ○ e ○	● ○ ● ● ○
WACHSMUTH ET AL. (2001)	● ● ○	● ○	● ● ○ ○ e ○	● ○ ● ∅ ○
BIERMANN ET AL. (2002), JUNG (2003)	○ ● ○	● ○	● ● ○ ○ e ○	● ○ ○ ∅ ○
<b>CVR/DVR</b>				
YE ET AL. (1999)	○ ● ○	● ○	○ ○ ● ○ e ○	● ○ ● ○ ○
<b>DBView</b>				
BUCK (1999), ULLMANN & SAUER (2000)	○ ● ○	○ ●	○ ● ○ ● b ○	● ○ ● ○ ○
<b>DIVIPRO</b>				
WEISS (2002), MARSH ET AL. (2004), GLEN- CROSS ET AL. (2006)	○ ● ○	● ●	○ ○ ● ○ b ○	○ ○ ● ● ●
<b>dVISE™</b>				
DEWAR ET AL. (1997)	○ ● ○	● ○	○ ○ ● ○ e ○	○ ● ○ ● ○
CHRYSSOLOURIS ET AL. (2000)	○ ● ●	● ○	○ ● ● ○ b ●	○ ● ○ ● ●
GARBAYA ET AL. (2003)	○ ● ○	● ○	○ ○ ● ○ e ○	○ ○ ● ● ●
<b>ICIDO (IDO:Package)</b>				
ICIDO (2006)	○ ● ○	○ ●	○ ○ ● ○ e ○	● ○ ○ ○ ○
<b>IVPS</b>				
LIU (2003)	○ ● ○	● ○	○ ● ● ○ e+b ○	● ○ ● ○ ○
<b>Lightning</b>				
HEGER (1998)	○ ● ○	● ○	○ ● ● ○ b ●	○ ● ○ ○ ○
<b>MAESTRO</b>				
STEFFAN (2001), STEF- FAN & KUHLN (2001)	○ ● ○	● ●	● ○ ● ○ e ○	● ○ ○ ● ●

Tabelle 2.1: Zusammenfassung I des Standes der Technik. Einstufung der Bewertungskriterien: ● erfüllt, ● teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt, ∅ keine Angaben

Systeme/Quellen	Anwendung Konstruktion Montagesimulation Ergonomieanalyse	Logik Wissens-/Regel-basiert Physik-basiert	Interaktion Sprache Gestik Cursor Hand (direkt) einhändig/Deidhändig virt. Werkzeuge	Ausgabe Großprojektion HMD Monitor akust. Rückkopplung hapt. Rückkopplung
<b>Responsive Workbench</b>				
FRÖHLICH ET AL. (2000)	○ ● ○	● ●	○ ○ ● ○ b ○	● ○ ○ ○ ○
<b>REVIMA</b>				
SAVALL ET AL. (2002)	○ ● ●	○ ○	○ ○ ● ○ e ●	○ ○ ● ○ ●
<b>USIS/AnySIM-VR-Extension</b>				
ROSSGODERER (2002)	○ ● ●	○ ○	○ ○ ● ● b ●	● ○ ● ○ ○
<b>VADE</b>				
CONNACHER ET AL. (1995)	○ ● ○	● ○	○ ○ ○ ● e ○	○ ● ○ ○ ●
JAYARAM ET AL. (1999a, b)	● ● ○	● ●	○ ○ ○ ● b ●	● ● ○ ● ●
SHAIKH ET AL. (2004)	○ ● ●	● ●	○ ○ ○ ○ ● e ○	○ ● ○ ○ ○
<b>VBB</b>				
ADAMS ET AL. (1999, 2001)	○ ● ○	● ○	○ ○ ● ○ e ○	○ ○ ● ○ ●
<b>VEDAM</b>				
ANGSTER (1996)	● ● ●	● ○	○ ○ ○ ● e ○	○ ● ○ ○ ○
<b>VEDA</b>				
GUPTA (1995), GUPTA ET AL. (1997b, a)	○ ● ○	○ ●	○ ○ ● ● e ○	○ ○ ● ● ●
<b>VD2</b>				
DE SÁ & ZACHMANN (1999), ZACHMANN (2000)	○ ● ○	● ●	● ● ○ ● b ●	● ● ○ ● ●
<b>Weitere Ansätze</b>				
MURRAY & FERNANDO (2004)	○ ● ○	● ○	○ ○ ● ○ b ○	● ○ ● ○ ○
YUAN & SUN (1997)	○ ● ○	● ○	○ ● ○ ○ e ○	○ ○ ○ ○ ○
GAUSEMEIER ET AL. (1998)	● ● ○	● ○	○ ● ● ○ e ○	● ● ○ ○ ○

Tabelle 2.2: Zusammenfassung II des Standes der Technik. Einstufung der Bewertungskriterien: ● erfüllt, ● teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt, ○ keine Angaben

Die visuelle Ausgabe ist bei mehr als der Hälfte der Lösungsansätze durch großflächige Projektionen, wie z. B. eine Powerwall, eine Holobench oder eine CAVE, möglich. Ein Drittel der vorgestellten Systeme verwenden u. a. ein HMD als Visualisierungsmedium, wobei dieses oftmals aufgrund des Gewichts und der Darstellungsart als benutzerunfreundlich und damit nicht für längere Arbeitseinsätze geeignet eingestuft wird. In fünf Fällen wird auf eine immersive Darstellung verzichtet und nur eine Desktopvisualisierung eingesetzt.

Akustische Signale werden trotz der nachweislichen Verbesserung bei der Interaktion (siehe z. B. PETZOLD ET AL. (2004)) in weit weniger als der Hälfte der umgesetzten Simulationsumgebungen verwendet. In 10 Fällen und somit in wenig mehr als einem Drittel der Ansätze wird haptisches Feedback (taktil und/oder kinästhetisches Feedback) unterstützt bzw. ist schon implementiert. Allerdings wird bei sechs weiteren Ansätzen das fehlende haptische Feedback explizit als Mangel des Systems hervorgehoben und einem Systemausbau mit haptischen Interaktionsgeräten großes Potenzial in der Verbesserung der Systembedienung und der Qualität der virtuellen Montagesimulation eingeräumt.

## 2.4 Defizite und Handlungsbedarf

Wie aus Abschnitt 2.3.5 hervorgeht, wurden bereits vielfältige Lösungsansätze verfolgt und entsprechende Systeme zur virtuellen Montagesimulation umgesetzt und erfolgreich getestet. Dennoch zeigen sich Defizite und Optimierungspotentiale bei den bestehenden Ansätzen in den Bereichen der Simulationsvorbereitung, der Simulationsdurchführung und der Benutzerinteraktion.

### **Defizite bei der Simulationsvorbereitung**

Bei der großen Mehrheit der betrachteten Systeme ist Wissens-/Regel-basiertes Objektverhalten die Grundlage für die Durchführung einer immersiven Montagesimulation. Diese Systeme ermöglichen durch die vereinfachte Berechnung des Verhaltens der virtuellen Objekte und durch logische Zwangsbedingungen auch die Beschreibung geometrisch komplexer Szenarien. Allerdings können die dafür notwendigen Informationen nur unzureichend über Featureerkennungsalgorithmen aus den für Echtzeitanwendungen typischen, einfach strukturierten Datenformaten entnommen werden. Die automatische Übernahme der entsprechenden Informationen beim Import von CAD-Daten in VR-Systeme ist ebenfalls nur in ersten Ansätzen gelöst. Vielmehr ist eine aufwändige manuelle Nachbearbeitung der Daten notwendig. Mangelnde Flexibilität des Simulationsverfahrens bei schnellen Variantenwechseln und potentielle Fehler bei der manuellen Definition der Zwangsbedingungen und Verbindungsregeln sind die Folgen. Im Gegensatz dazu ist bei rein Physik-basierten Ver-

fahren nur die Festlegung physikalischer Basisgrößen wie der Dichte bzw. Masse und Massenverteilung oder des Reibkoeffizienten notwendig, um während der Simulationsdurchführung ein realitätsnahes Objektverhalten berechnen zu können. Die geometrischen Modelle selbst müssen nicht weiter mit zusätzlichen Informationen manuell aufbereitet werden, wodurch potentielle Fehlerquellen in diesem Arbeitsschritt vermieden werden können. Die Entwicklung eines eigenen IMS-Systems sollte demnach zur Reduktion des Aufwands und der potentiellen Fehlerquellen in der Simulationsvorbereitung auf ein rein Physik-basiertes Verfahren zurückgreifen.

### **Defizite bei der Simulationsdurchführung**

Bei der aktuellen Simulationsdurchführung sind vorrangig zwei Optimierungsmöglichkeiten zu betrachten. Erstens ist eine deutliche Abweichung des Objektverhaltens der virtuellen Objekte von dem bekannten realen Objektverhalten erkennbar, was vor allem bei den verbreiteten Regel-basierten Ansätzen von Versuchspersonen als Einschränkung angemerkt wird. Der Vorteil einer immersiven, intuitiven Simulationsdurchführung ist damit reduziert. Fast vergleichbare Aussagen zur Montageverifikation können dadurch auch mit geringerem technischen und damit auch verbunden geringerem finanziellen Aufwand in nicht-immersiven Desktop-3-D-Simulationssystemen gewonnen werden. Zweitens wird durch Wissens-/Regel-basierte immersive Simulationssysteme ein Teil des Simulationsergebnisses vorweggenommen. Fehlerhaft vorbereitete logische Verknüpfungen führen unweigerlich zu verfälschten Aussagen bei der immersiven Montagesimulation. Eine intuitive Bewertung der Simulationsergebnisse ist damit erschwert. Aufgrund der Anforderung einer aussagekräftigen und realitätsnahen Simulationsdurchführung ist die Entwicklung einer rein Physik-basierten Echtzeitsimulationsumgebung anzustreben. Diese soll die virtuelle Montageszene, die Objektdynamik und den Fügeprozess realitätsnah abbilden und die intuitive, interaktive Durchführung der Simulation nicht durch vordefinierte Bedingungen einschränken.

### **Defizite bei der Benutzerinteraktion**

Ein weiteres Defizit ist im Bereich der aktuell umgesetzten Benutzerinteraktion vorzufinden. Es existieren nur wenige und i.d.R. ergonomisch unzureichende Eingabegeräte (NEUGEBAUER ET AL. 2004). Bei den meisten Systemen zur virtuellen Montagesimulation werden zwar immersive räumliche Interaktionsgeräte eingesetzt, wobei eine unzureichende Benutzerinteraktion dennoch häufig gegeben ist. Die menschliche Feinmotorik, die bei manuellen Tätigkeiten eine wichtige Bedeutung hat, wird jedoch nicht unterstützt. Eine realitätsnahe Abbildung des menschlichen Greifprozesses, basierend auf physikalischen

Prinzipien in Kombination mit haptischem Feedback, ist bisher ebenfalls nur ansatzweise realisiert. Üblicherweise werden die virtuellen Objekte fest mit den virtuellen Manipulatoren wie z. B. Cursor oder Hand gekoppelt, wodurch der Greifprozess entfällt und ein großer Teil der Flexibilität bei der Objektmanipulation verloren geht. Die Anwender können somit kein „Gefühl“ für die Aufgabe entwickeln und unrealistisch große Armbewegungen oder ein häufiges Umgreifen, was die Simulation weiter verfälscht, sind die Folgen.

### **Handlungsbedarf zur Entwicklung des Systems Ve<sup>2</sup>**

Die beschriebenen Defizite sind durch Mängel in der Simulationsvorbereitung und der Simulationsdurchführung gekennzeichnet, denen durch eine systematische Integration einer echtzeitfähigen Physiks simulation begegnet werden kann. Im Bereich der Benutzerinteraktion stehen die Defizite derjenigen betrachteten Systeme bei der direkten Handinteraktion im Vordergrund, die dem Benutzer keine realitätsnahe intuitive Interaktion und Objektmanipulation erlauben. Der sich zusammenfassend aus den Lösungsansätzen ableitende Handlungsbedarf ist somit die Neuentwicklung eines speziellen, rein Physik-basierten VR-Systems zur Durchführung immersiver Montagesimulationen in Kombination mit einem haptischen Interaktionsgerät. Dieses soll die feinmotorische Leistungsfähigkeit der Hand bestmöglich unterstützen, wodurch nur kraftrückkoppelnde Handschuhe, die die Feinmotorik der einzelnen Fingern ermöglichen, in Betracht kommen. Das im Rahmen dieser Arbeit speziell entwickelte VR-System wird im weiteren Verlauf mit Virtual Engineering Environment (Ve<sup>2</sup>) bezeichnet.





## 3 Grundlagen

### 3.1 Inhalt des Kapitels

Um dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen Handlungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung eines Physik-basierten VR-Systems für die Montagesimulation mit einem kraftrückkopplenden Handschuh technisch optimal gerecht werden zu können, müssen die grundlegenden Bestandteile ausgewählt und die unterschiedlichen Aspekte und Prinzipien der Benutzerinteraktion erkannt und verstanden werden. Nur so kann ein effizientes, intuitives Rechnerwerkzeug für die immersive Montagesimulation (IMS) zielgerichtet entwickelt werden.

Das vorliegende Kapitel beschreibt deswegen die bekannten Grundlagen und die zu berücksichtigenden Aspekte hinsichtlich der Benutzerinteraktion und der zentralen Hardware- und Softwarekomponenten. Es werden Interaktionsmechanismen, Greifstrategien, Handeingabegeräte und Algorithmen zur Kollisionserkennung für die Physiksimation und für das haptische Rendering vorgestellt und in Bezug auf die IMS diskutiert.

### 3.2 Benutzerinteraktion

#### 3.2.1 Psychologische Aspekte

Ziele des zu entwickelnden Systems sind die intuitive Analyse und die Optimierung der räumlichen, strukturellen und zeitlichen Aspekte des Montageprozesses in einer virtuellen Montageumgebung. Dabei muss der Anwender einerseits schon existierende Planungsvorgaben umsetzen und auf Widersprüche und Schwachstellen hin überprüfen. Andererseits sollen während der IMS erkannte Probleme gelöst und sofort kreativ Lösungsvorschläge erarbeitet werden. In beiden Anwendungsfällen muss der Benutzer optimal unterstützt werden, um den Problembereich schnell zu erfassen, Entscheidungen hinsichtlich potentieller Lösungsvarianten zu treffen und diese unmittelbar zu testen.

Ein Modell zur Beschreibung der Verbindung zwischen Wahrnehmung, Interpretation und Handlung stellt NORMAN (1989, S. 62–64) vor. Er nennt es den „Zyklus des Handelns“,

der aus den drei Stufen Ziel, Ausführung und Auswertung besteht. Die *Ausführung* ist dabei die Erledigung der Aufgabe. Die *Auswertung* dagegen ist der Vergleich zwischen dem, was in der Welt vorgeht und dem, was beabsichtigt ist – dem *Ziel*. Die Schwierigkeit für den Benutzer besteht nun in der konkreten Übersetzung seiner Ziele in Interaktionen mit der realen bzw. im übertragenen Sinne mit der virtuellen Umwelt. NORMAN (1989) nennt zwei wesentliche Hürden, die den Anwender an einer korrekten Übersetzung hindern. Als erste Hürde bezeichnet er den Unterschied zwischen Interaktion und zulässigen Handlungen bei der Ausführung, da die Art und Anzahl der zulässigen Operationen z. B. durch physische Einschränkungen begrenzt werden. Daneben sieht er als zweite Hürde die Schwierigkeit in der Auswertung, die der Anwender leisten muss, um den physikalischen Zustand des Systems zu interpretieren und um zu bestimmen, inwieweit die Erwartungen und Interaktionen erfüllt worden sind. Zur Verarbeitung und Überwindung dieser beiden Hürden laufen im Anwender komplexe Prozesse ab. Diese erstrecken sich von der sensorischen Informationsgewinnung durch körperliche Reize, über die Interpretation der Informationen bzw. die Erkenntnisgewinnung, bis hin zur motorischen Umsetzung konkreter Handlungen. STADLER (1997) stellt zur Verdeutlichung der Prozesse und gegenseitigen Wirkrelationen – wie in Abbildung 3.1 erkennbar – die Vernetzung in einem Wahrnehmungs-Handlungs-Kreis zusammen. Dabei wird, ausgehend von einem Objekt, über einen Energiefluss ein körperlicher Reiz auslöst. Die Signale dieser Sinneswahrnehmung werden über zum Zentralnervensystem (ZNS) hinführende, aufsteigende Nervenfasern (Afferenz) zum ZNS geleitet. Die Wahrnehmung wird dort verarbeitet und eine Handlungsabsicht davon abgeleitet, die neue Aktionspotentiale erzeugt. Diese werden über die vom ZNS wegführenden bzw. absteigenden Nervenfasern (Efferenz) an die Peripherie bzw. an die so genannten Erfolgsorgane wie z. B. die Skelettmuskeln übermittelt. So kann durch die Motorik die Umwelt beeinflusst werden, wodurch sich der Kreis schließt. Über den Rückkopplungsmechanismus der Reafferenz wird sichergestellt, dass die beabsichtigte Handlung dem tatsächlichen Ergebnis entspricht; Korrekturen werden ggf. eingeleitet.

Damit der Wahrnehmungs-Handlungs-Kreis vollständig erfüllt ist und es dem Anwender intuitiv gelingt, durch die wahrnehmbaren Informationen seine Ziele optimal in eine effiziente Interaktion zu übersetzen, definiert NORMAN (1989) vier grundlegende Designaspekte für die Gestaltung von Benutzerschnittstellen: Sichtbarkeit, Rückmeldung, Zuordnung und ein gutes konzeptionelles Modell. *Sichtbarkeit* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass nicht nur die wichtigen Teile, sondern auch der Zweck und die richtige Handhabung ersichtlich sein müssen. Damit kennt der Benutzer die Funktionsweise der Teile und er weiß, wie er mit dem Gerät bzw. mit dem System in Verbindung treten soll. Die Sichtbarkeit ist v. a. wichtig, um die Hürden bei der Ausführung zu überbrücken. Mit den menschlichen

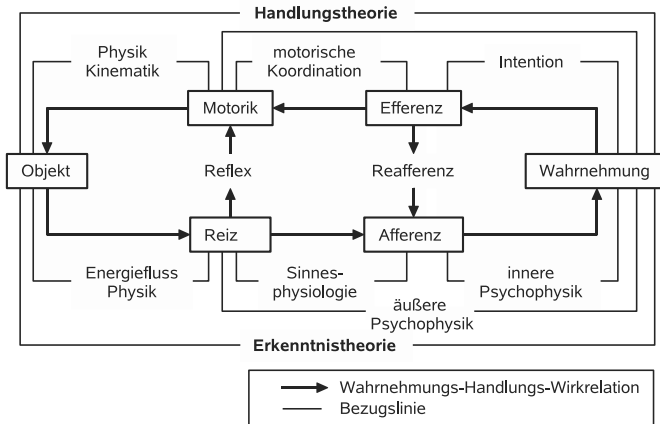


Abbildung 3.1: Wahrnehmungs-Handlungs-Kreis von STADLER (1997)

Sinnen wahrnehmbare *Rückmeldungen* zeigen dem Benutzer an, welche Handlung tatsächlich ausgeführt bzw. welches Ergebnis erreicht worden ist. Wenn eine Handlung kein offensichtliches Ergebnis hat, schließt man daraus, dass sie ineffektiv war. Durch ständige Rückkopplung werden die Ergebnisse einer Tätigkeit benützt, um weitere zu steuern. Dadurch wird die Hürde der Auswertung laufend reduziert. Als *Zuordnung* (Mapping) wird die Beziehung zwischen zwei Elementen, wie z. B. zwischen den Bedienungsvorrichtungen bzw. deren Betätigung und dem Ergebnis, bezeichnet. Natürliche Mappings sind dabei leicht erlernbar und werden nicht mehr vergessen. Ebenso wichtig ist ein gutes *konzeptuelles Modell*, damit die Funktionsweise einer Anwendung sichtbar und vorhersagbar ist. Die Diskrepanz zwischen den Denkmodellen und dem tatsächlichen Handeln spiegelt die Distanz zwischen den gedanklichen Modellen der Menschen und den physischen Komponenten und Zuständen der Umwelt wider. *Denkmodelle* sind nach NORMAN (1989, S. 28) „... Modelle, die Leute von sich, anderen, der Umgebung und den Dingen, mit denen sie Umgang haben, entwerfen“. Dabei sind die individuellen Unterschiede der einzelnen Modelle zu berücksichtigen, da diese aus den jeweiligen persönlichen Erfahrungen, Unterweisungen oder Anleitungen gewonnen werden.

Werden die von NORMAN (1989) geforderten Strategien auf die Gestaltung eines Werkzeugs zur rechnerunterstützten Montageplanung übertragen, so kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine realitätsnahe Abbildung des Montageszenarios und der realen Interaktionsmöglichkeiten in einer immersiven virtuellen Umgebung eine effiziente und effektive Arbeitsumgebung für den planenden Mitarbeiter verspricht. Die kognitive Last

für den Bediener sinkt durch das realitätsnahe Gesamtszenario und er kann sich besser auf die Lösung der eigentlichen Aufgabe konzentrieren. Diese Schlussfolgerung wird durch die Forderung von BOWMAN ET AL. (1998, S. 481) an die Entwicklung virtueller Umgebungen bekräftigt, die besagt, dass die Interaktion mit der virtuellen Umgebung „natürlich“ oder ähnlich wie in der realen Welt sein sollte.

#### 3.2.2 Physiologische Aspekte

Während der manuellen Montage ist die menschliche Hand bei der Umsetzung der Ziele in Handlungen der entscheidende Endeffektor. Dabei dienen die Hand und das damit verbundene Arm-Schulter-System nicht nur als Manipulator, sondern auch als Sensor. Für eine optimale Interaktion während einer IMS ist es somit von großer Bedeutung, die sensorischen und sensomotorischen Eigenschaften der menschlichen Hand in geeigneter Art und Weise zu unterstützen.

##### Sensorische Eigenschaften

Die sensorischen Eigenschaften des Hand-Arm-Schulter-Systems umfassen den Hautsinn, die Kinästhesie und die Propriozeption. Die Definition des *Hautsinns* ist nach CHARWAT (1994, S. 212) folgende: „Die freien Nervenenden in der Haut machen sie zu einem Sinnesorgan für die Wahrnehmung von Temperatur, Druck und Schmerz“. Taktile Informationen werden somit ebenfalls über den Hautsinn aufgenommen. Die *Kinästhesie* ist nach CHARWAT (1994, S. 237) „... die Propriozeption, die einer Person ihre eigenen Körperbewegungen gewahr werden lässt“. Die Kinästhesie beruht z. B. auf der Erfassung der Winkelstellungen der Gelenke zueinander, der Muskelaktivitäten und der relativen Position der Haut zu einer berührten Fläche. Für die *Propriozeption* gibt CHARWAT (1994, S. 352) folgende Begriffsbestimmung: „Propriozeption (zu deutsch Selbstwahrnehmung) vermittelt einer Person Empfindungen über ihre eigene Bewegung (Kinästhesie) sowie über Lage und Stellung ihrer eigenen Gelenke [...]. Dazu werden Sinnesorgane in den Muskeln (Kraftanspannung), in den Gelenken und im Innenohr (Vestibularorgan) benötigt“. Die in diesem Zusammenhang oft verwendete Bezeichnung *haptisch* (griechisch für greifbar), wird im Deutschen mit der Bedeutung „den Tastsinn betreffend“ benutzt (CHARWAT 1994, S. 211). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird allerdings der Wortgebrauch entsprechend dem bei BURDEA & COIFFET (1996, S. 4) bevorzugt: So wird die *haptische Rückkopplung/Feedback* als übergeordneter Begriff für Kraftrückkopplung, taktile Rückkopplung und propriozeptive Rückkopplung verwendet. Dieser Wortgebrauch wird auch in Bezug auf die Geräteklassifikation als *haptische Geräte* angewendet.

Die Bandbreite der Wahrnehmungsfähigkeit des Hand-Arm-Schulter-Systems zeigt SHIMOGA (1992) auf. So arbeiten die menschliche kinästhetische/propriozeptive Wahrnehmung mit einer Bandbreite von ca. 20 bis 30 Hz und die taktile Wahrnehmungsfähigkeit in einem Bereich von 0 bis 400 Hz. Kraftsignale können nur bis zu 320 Hz unterschieden werden. Das räumliche Auflösungsvermögen der Haut ist an den Fingerspitzen am höchsten und beträgt bei der Differenzierung zweier aus verschiedenen Kraftsignalen bestehender Reize ca. 2,5 mm (SHERRICK & CRAIG 1992). Die Winkelauflösung der Gelenke, untersucht von TAN ET AL. (1994), beträgt  $2,5^\circ$  an den Fingergelenken,  $2,0^\circ$  am Handgelenk und am Ellenbogengelenk und  $0,8^\circ$  an der Schulter. Die Kraftauflösung der Haut – ebenfalls an der Hand am höchsten – beträgt ca.  $7,9 \cdot 10^{-4}$  N an den Fingerspitzen und ca.  $1,5 \cdot 10^{-3}$  N an der Handfläche (SHERRICK & CRAIG 1992).

### **Sensomotorische Eigenschaften**

Die vielseitigen sensomotorischen Eigenschaften der Hand lassen sich allein daran erkennen, dass es sich bei der Hand um das beweglichste Körperteil des Menschen handelt, bestehend aus 27 Handknochen, 28 Gelenken und 33 Muskeln (GROSSKOPF 2004, S. 9). Auch anhand des überaus großen Gehirnareals, das der Kontrolle der Hände zugeordnet ist, lässt sich die Leistungsfähigkeit aufzeigen (WEHR 2005, S. 35). So ist die Steuerung der Hand eine der differenziertesten und am höchsten entwickelten Funktionen des menschlichen ZNS, die der Mensch in seinem motorischen Repertoire hat. Die Hand ermöglicht nicht nur die Durchführung zielgerichteter und komplexer motorischer Funktionen wie z. B. das Ergreifen von Gegenständen, das Fassen eines Handgriffes oder den Gebrauch von Werkzeug, sondern auch die Kommunikation über Gestik und Schreiben (GROSSKOPF 2004, S. 7). Die zielgerichtete Bewegung des Hand-Arm-Systems erfordert beim Zugreifen die koordinierte Kontrolle von Arm, Hand und Fingern sowie den Augen bzw. des Kopfes. Diese Teilbewegungen werden über die drei motorischen Kontrollschienen Transportkomponente, Ausrichtungskomponente und optische Komponente gesteuert (ARLT 1999, S. 31). Die Transportkomponente stellt eine zielgerichtete Bewegung vom Startpunkt zum Zielpunkt sicher, wohingegen die Ausrichtungskomponente die Hand und die Finger steuert und einen sicheren Zugriff ermöglicht. Diese beiden Komponenten sind von der optischen Komponente abhängig, die die Position sowie die Form und die Größe eines Objekts im Raum bestimmt.

Die am Zielobjekt angewendeten Griffarten lassen sich in drei grundsätzlich verschiedene Varianten aufteilen, die anhand der Kopplungsglieder Handfläche, Handkante und Finger charakterisiert werden können. So unterscheiden BULLINGER & SOLF (1979, S. 108) Kontaktgriffe, gekennzeichnet durch das Aufsetzen eines Fingers und oder der Handfläche/Handkante, Zufassungsgriffe, die nur die Finger beim Zugreifen einsetzen, und Um-

fassungsgriffe, die die Finger in Kombination mit der Handfläche mit einbinden. Zufassungsgriffe und Umfassungsgriffe entsprechen damit weitgehend der Griffkategorisierung nach CUTKOSKY & HOWE (1990) in Präzisions- und Kraftgriffe. Die verschiedenen Griffvarianten der beiden Ordnungsschemata sind in Abbildung 3.2 zusammengefasst. Die kennzeichnenden Eigenschaften der Präzisionsgriffe sind durch den reinen Kontakt der Finger/Fingerspitzen mit dem zu greifenden Objekt gegeben. Diese äußern sich durch eine geringe Greifkraft in Verbindung mit einer großen Beweglichkeit der Finger, die zur Feinmanipulation genutzt werden kann. Im Gegensatz dazu sind Kraftgriffe durch den Einsatz der Handfläche durch einen stabilen Griff und durch hohe Greifkräfte charakterisiert. Sie bieten jedoch durch das enge Aufliegen der Finger auf dem gegriffenen Objekt nur eine geringe Möglichkeit zur Feinmanipulation.

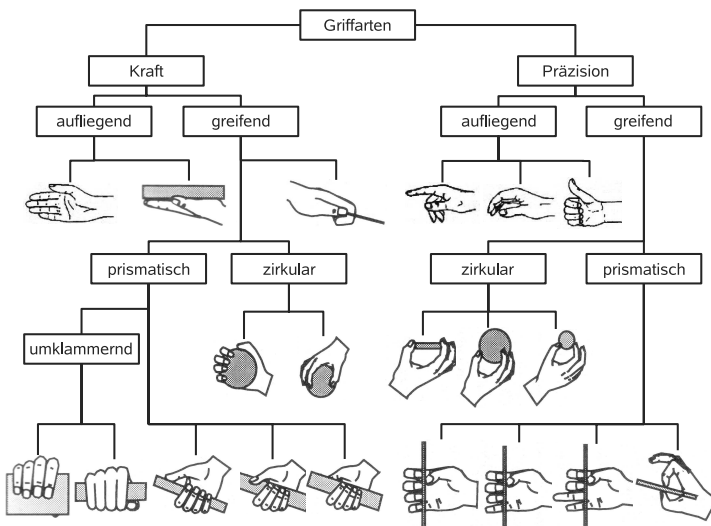


Abbildung 3.2: Griffarten nach CUTKOSKY & HOWE (1990), ergänzt um aufliegende Kontaktgriffe nach BULLINGER & SOLF (1979, S. 108)

Die bei Griffen durch die Finger kontrolliert ausübbarer Kraft liegt nach TAN ET AL. (1994) bei ca. 17 N bei weiblichen Personen und bei ca. 45 N bei männlichen Personen. Die ohne eine deutliche unangenehme Ermüdung aufbringbaren Dauerkraften sind jedoch viel niedriger und liegen in Abhängigkeit der individuellen Maximalkraft unter 15 % der maximalen Werte (WIKER ET AL. 1989). Basierend auf Versuchen zur Leistungsfähigkeit der Kraftauflösung, kommen SRINIVASAN & CHEN (1993) zu der Empfehlung von

$1,0 \cdot 10^{-2}$  N für haptische Interaktionsgeräte, um die menschlichen Möglichkeiten voll ausschöpfen zu können. Die Bandbreite der sensomotorischen Fähigkeiten, in der von den Fingern noch definierte Kräfte ausgegeben werden können, reicht nach SHIMOGA (1992) bis etwa 5 bis 10 Hz.

### Augmentierung und Substitution haptischer Informationen

In einem gewissen Umfang ist es möglich, haptische Informationen zu substituieren. Durch zusätzliche Anreicherung um weitere Signale können aber auch der haptische Eindruck verbessert und die Leistungsfähigkeit des Benutzers bei der haptischen Manipulation gesteigert werden. Dabei scheint die Kombination von haptischem und auditivem Feedback am vorteilhaftesten zu sein. So konnten FABIANI ET AL. (1996) eine Verbesserung des Feingefühls bei der Manipulation feststellen. Auch die Ergebnisse von MINER ET AL. (1996) und DiFRANCO ET AL. (1997) sprechen für die Existenz von haptisch-auditiven Interaktionen: Eine virtuelle Wand wurde als härter empfunden, wenn zeitgleich mit der Berührung ein kurzer Kontaktton zu hören war. Ergänzend zeigen DEML (2004) und PETZOLD ET AL. (2004), dass das kombinierte haptische und auditive Feedback dem Benutzer bei einer Montageaufgabe das immersivste Gefühl zu vermitteln vermag und so die geforderte Aufgabe am effizientesten auszuführen ist. Die Ergebnisse zeigen des Weiteren, dass die Substitution des reinen Kraftsignals durch auditives bzw. visuell/auditives Feedback keine negative Veränderung in der Performanz zur Folge hat (Abbildung 3.3).

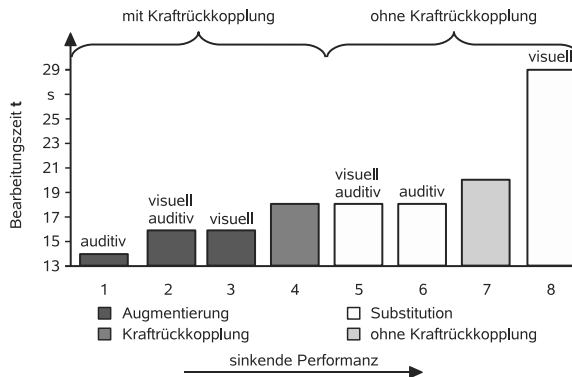


Abbildung 3.3: Sensorische Substitution: Die Substitutions- und Augmentierungsdisplays sind aufsteigend nach der Dauer der Bearbeitungszeit einer Montageaufgabe angeordnet (DEML 2004, S. 85)

### 3.2.3 Regelungstechnische Aspekte

Die beim Zugreifen resultierende Rückkopplung beim Einsatz haptischer Interaktionsgeräte unterscheidet sich maßgeblich von visuellen und akustischen Rückkopplungen. Im Gegensatz zu visuellen und akustischen Rückkopplungen ist der Anwender haptischer Interaktionsgeräte bidirektional mit dem System verbunden. Vom Benutzer aufgebrachte Kräfte beeinflussen den Status der virtuellen Welt, woraus sich wieder Kräfte ergeben, die unmittelbar an den Benutzer zurückgekoppelt werden. Dadurch ergibt sich ein geschlossener Informationskreislauf.

ADAMS ET AL. (1998) beschreiben den haptischen Regelkreis für positionsgeregelte und kraftgeregelte Eingabegeräte (siehe Abbildung 3.4).  $v_h$  und  $F_h$  sind dabei die an der Koppelstelle Benutzer/Gerät herrschenden Kräfte und Geschwindigkeiten.  $F_d$  ist die Kraft, die das Gerät erzeugt, und  $v_d$  ist die Geschwindigkeit, die aus den Sensoren abgeleitet werden kann.  $F_e$  und  $v_e$  sind die daraus resultierenden Kräfte und Geschwindigkeiten, die auf das virtuelle Objekt in der Physik-basierten virtuellen Umgebung wirken. Die Indices *ber* stehen dabei für berechnet und *mess* für gemessen. Die unkommentierte Richtung der Verbindungspfeile kennzeichnet den Informationsfluss einer Positionsregelung. Die Richtungen in Klammern stehen für die kraftgeregelte Variante. In diesem Fall gelten auch die Indices *ber* und *mess*. Dadurch sind vier unterschiedliche Varianten möglich. Für den häufigen Fall eines positionsgeregelten Geräts mit einer Positions-basierten Umgebung gelten für die virtuelle Kopplung die einfachen Beziehungen  $v_d = v_e$  und  $F_e = F_d$ . In einer rein kraftgeregelten Konfiguration gelten hingegen  $v_{ber} = v_e$  und  $F_e = F_{mess}$ .

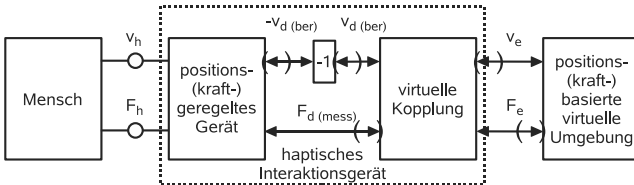


Abbildung 3.4: Informationsfluss in einem haptischen Regelkreis nach ADAMS ET AL. (1998) im Falle einer Positionsregelung oder mit einer mit Klammern gekennzeichneten Kraftregelung

Bei nicht optimaler Regelung können durch die ausgetauschten Energieströme Instabilitäten entstehen, die eine gezielte haptische Interaktion u. U. stark stören können. Um diesen Effekt zu vermeiden und die Passivität der virtuellen Umgebung zu gewährleisten, sind zur Regelung der haptischen Rückkopplung hohe Abstraten und Berechnungsge-



schwindigkeiten notwendig. So sind nach SHERIDAN (1992) sowie GREGORY ET AL. (1999) Wiederholraten von ca. 1 kHz erforderlich. Passivität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bei der Interaktion mit der virtuellen Welt in Summe keine Energie gewonnen werden darf, was zu Instabilität führen würde, jedoch prinzipiell durch die digitale Berechnung der Kontaktkräfte gegeben ist. Abbildung 3.5 zeigt diesen Effekt anhand einer schematischen Darstellung am Beispiel des Kontakts mit einer virtuellen Wand, modelliert durch eine Feder mit der Auslenkung  $\mathbf{x}_f(t_i)$ , die der letzten erfassten Position  $\mathbf{x}_f(t)$  zum Zeitpunkt  $i$  des Interaktionsgeräts entspricht. Der erste bzw. letzte Zeitschritt des Anschauungsbeispiels ist mit  $t = t_0$  und  $t = t_e = t_7$  gekennzeichnet.  $\mathbf{F}_f(t)$  bezeichnet die auf der Federsteifigkeit  $k_s$  basierend berechnete Kraft (Gleichung 3.1), die der Benutzer beim Eindringen in die virtuelle Wand überwinden muss.  $W_{ein}$  ist die Summe der Eindringarbeit bzw. der Arbeit, die beim Spannen der virtuellen Feder aufgewendet werden muss, und  $W_{aus}$  ist die Summe der gewonnenen Arbeit beim Verlassen der Wand bzw. bei der Entspannung der virtuellen Feder (Gleichung 3.2 und 3.3). Aus diesem Anschauungsbeispiel wird sowohl die unausgeglichene Energiebilanz deutlich, die zur Instabilität führt, als auch der stabilisierende Effekt einer kleineren Schrittweite  $\Delta t = t_{i-1} - t_i$  bzw. einer geringeren Steifigkeit  $k_s$ . Weiterführende Verfahren, die zum Energieausgleich beim Spannen und Entspannen virtueller Federn zur Kontaktdarstellung dienen, werden von ELLIS ET AL. (1997) beschrieben. Es gilt

$$\mathbf{F}_f(t_i) = -k_s \cdot (\mathbf{x}_f(t_i)) \quad (i = 0, \dots, 7), \quad (3.1)$$

$$W_{ein} = \sum_{t=t_0}^{t=t_e/2} \mathbf{F}_f(t_{i-1}) \cdot (\mathbf{x}_f(t_{i-1}) - \mathbf{x}_f(t_i)), \quad (3.2)$$

$$W_{aus} = \sum_{t=t_e/2}^{t=t_e} \mathbf{F}_f(t_{i-1}) \cdot (\mathbf{x}_f(t_{i-1}) - \mathbf{x}_f(t_i)). \quad (3.3)$$

Eine hohe Abtastrate ist jedoch nicht allein ausschlaggebend für die fühlbare Qualität der haptischen Interaktion. So spielen sowohl die Dämpfung des Interaktionsgeräts eine große Rolle wie auch die erreichbare virtuelle Steifigkeit und virtuelle Dämpfung. BROWN & COLGATE (1994) stellen den Zusammenhang am Beispiel des harten Kontakts an einer virtuellen Wand folgendermaßen dar (Gleichung 3.4):

$$b_h > \frac{K_v T}{2} + |B_v| \quad (3.4)$$

Dabei ist  $b_h$  die dem Interaktionsgerät inhärente Dämpfung,  $K_v$  die erreichbare virtuelle Steifigkeit und  $B_v$  die virtuelle Dämpfung. Der in dieser Gleichung ersichtliche Zusammenhang zwischen der Abtastrate  $T$  und  $K_v$  wird auch von LOVE & BOOK (1995) beschrieben. Danach ist für die Darstellung harter Kontakte mit einer Steifigkeit von 6,7 kN/m eine

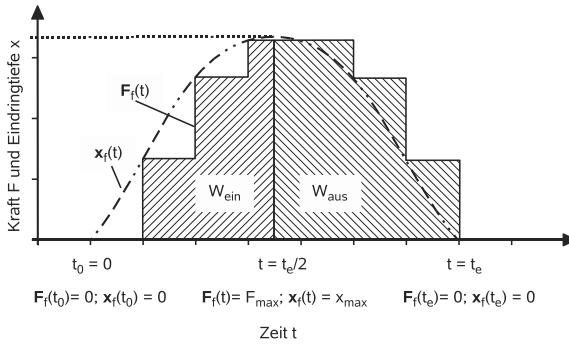


Abbildung 3.5: Kraftverlauf und aufgewandte Arbeit während des Kontakts mit einer virtuellen Wand (modelliert durch eine virtuelle Feder)

Update-Rate von 100 Hz notwendig. Für die Darstellung der Oberflächensteifigkeit von 70 kN/m bedarf es einer Update-Rate von 1 kHz. Aufgrund unbekannter Dämpfungsverhältnisse und nicht linearer Reibverhältnisse bei den haptischen Interaktionsgeräten ist es jedoch nicht trivial, die richtigen Dämpfungs- und Steifigkeitswerte vorab zu bestimmen. Nach ADAMS ET AL. (1998) erfordert dies eine experimentelle Anpassung der Parameter an die jeweilige Anwendung.

### 3.2.4 Basisinteraktion

Unter Berücksichtigung der physischen Leistungsfähigkeit des Anwenders sollte, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, die Systembedienung für den Benutzer klar verständlich und optimalerweise intuitiv möglich sein. Eine bewährte und seit Ende der 80er Jahre gebräuchliche Interaktionsmetapher für grafische Benutzeroberflächen (GUI) ist die Windows-Icons-Menu-Pointer-Metapher (WIMP). Diese Interaktionsmetapher, die der Benutzer als Schreibtischoberfläche assoziiert, ist optimal an die 2-D-Interaktion mit dem Computer mittels der Standardeingabegeräte Maus und Tastatur für Desktopanwendungen jeglicher Art angepasst. 3-D-Anwendungen lassen mit einer derartigen Benutzeroberfläche prinzipbedingt nur indirekte Aktionen zu. Diese sind durch Kommandosprachen sowie durch Menü- oder Buttoninteraktionen charakterisiert. Aufgrund des starken Gewöhnungseffekts der Benutzer stellt dies für Desktopanwendungen jedoch keine besondere Beeinträchtigung dar. Bei immersiven 3-D-Anwendungen ist jedoch der Dimensionenunterschied nachteilig, da weder 3-D-Eingabeinformationen effizient mit einer 2-D-Benutzeroberfläche umgesetzt

werden können noch eine entsprechende 3-D-Rückkopplung möglich ist. So erkannten BOWMAN ET AL. (2001, S. 96), dass die einfache Adaption der traditionellen WIMP-Interaktion keine Lösung für 3-D-Anwendungen darstellt. Auch STANNEY ET AL. (1998, S. 339) beschäftigten sich mit diesem Problem und kommen in Bezug auf die herkömmliche WIMP-Metapher zu dem Schluss, dass die Interaktion in virtuellen Umgebungen speziell angepasste Interaktionsmetaphern erfordert. Durch sog. Post-WIMP-GUIs, die mittels 3-D-Menüs, 3-D-Cursor, Sprache, Gesten oder durch die direkte 3-D-Interaktion mit der menschlichen Hand gesteuert werden, wird versucht, diese Herausforderung zu bewältigen. Je nach Anwendungsfall sind dabei unterschiedliche Varianten, wie von BOWMAN (1999) und BOWMAN ET AL. (2005) aufgezeigt, vorteilhaft. In Anlehnung an RÖSSLER (2001, S. 39) müssen dabei jedoch im Allgemeinen die zur Basisinteraktion zusammengefassten vier Interaktionsformen gewährleistet sein:

- räumliche Navigation,
- Selektion,
- Objekt-Veränderung und
- Objekt-Bewegung.

Die IMS stellt diesbezüglich jedoch besondere Anforderungen an die Basisinteraktion, was eine spezielle Gewichtung der vier Interaktionsformen zur Folge hat. Die *Navigation* bedeutet die Kontrolle der Position bzw. des Blickpunktes des Benutzers in der 3-D-Umgebung. Sie kann dabei für die Exploration einer größeren virtuellen Umgebung in räumlich großen Dimensionen dienen wie auch der genauen Positionierung in einem lokal eng begrenzten Raum. Damit kann z. B. die optimale Perspektive auf ein Montageszenario eingestellt werden. Bei der IMS spielt die Navigation eine untergeordnete Rolle, da es sich um keine explorative Aufgabe handelt. Für die effiziente Simulationsdurchführung sollte eine optimale Perspektive auf das Montageszenario schon voreingestellt werden. Lokal begrenzte Veränderungen der Perspektive sollten jedoch z. B. über die Erfassung der Kopfbewegung bzw. der Blickrichtung möglich sein. Die Interaktionsformen *Selektion* und *Objekt-Veränderung* sind sehr eng miteinander verknüpft und bedeuten die gezielte Auswahl und Veränderung der Eigenschaften virtueller Objekte. Entsprechend der Navigation sind diese Interaktionsformen während einer IMS ebenfalls nicht als vorrangig zu betrachten. Die Selektion dient besonders zur indirekten Interaktion und stellt im Vergleich zu der Interaktion mit realen Objekten einen zusätzlichen artifiziellen Schritt dar, der in der IMS vermieden werden sollte. Die Objekt-Veränderung mit der Aufgabe, gezielt Eigenschaften virtueller Objekt zu verändern, fällt ebenfalls nicht in das erforderliche Funktionsspektrum einer IMS, da die Simulation die Überprüfung der vordefinierten Geometrien

und Objekteigenschaften zum Ziel hat. Erforderliche Änderungen der Objekteigenschaften werden in einem nachgeschalteten Prozessschritt von den dafür im Planungsprozess optimal ausgelegten Rechnerwerkzeugen – wie z. B. 3-D-CAD-Anwendungen – durchgeführt. Für die auf eine direkte Handinteraktion ausgelegte IMS bildet die Interaktionsform der *Objekt-Bewegung* den funktionalen Schwerpunkt. Dadurch sind alle für die Simulationsdurchführung erforderlichen Funktionen wie die Objektaufnahme, der Objekttransport, die Grob- und Feinausrichtung, das Zusammensetzen und das Ablegen bzw. Loslassen der Objekte realisierbar.

#### 3.2.5 Direkte Handinteraktion

Die direkte Handinteraktion ist eine der unmittelbarsten Interaktionsmöglichkeiten mit einer virtuellen Umgebung. Dabei wird die reale menschliche Hand als virtuelles Pendant in der virtuellen Umgebung abgebildet und reale Bewegungen werden 1:1 in virtuelle Hand- und Fingerbewegungen umgesetzt. Zur effizienten Durchführung einer IMS mit direkter Handinteraktion ist die Unterstützung der Interaktionsform Objekt-Bewegen mit allen Teilschritten erforderlich. Die Realisierung eines definierten kontrollierten und stabilen Griffs als Basis für die Objektbewegung ist dabei die größte Herausforderung. Die dafür bisher entwickelten Greifalgorithmen lassen sich in Logik-basierte, Kinematik-basierte und Physik-basierte Varianten untergliedern.

##### Logik-basiertes Greifen

Diese Greifalgorithmen basieren auf dem Prinzip, dass ein Objekt aufgrund eines indirekten Befehls oder einer spezifischen Konstellation von Kollisionen zwischen der virtuellen Hand und dem zu greifenden Objekt als gegriffen definiert wird. Das so „gegriffene“ Objekt wird daraufhin gemäß der Orientierung und Position der Hand entsprechend mitgeführt. Ein realitätsnahes, variables Greifen bzw. eine Feinmanipulation der Objekte ist prinzipbedingt bei diesem Greifansatz nicht möglich, da die Objekte kinematisch fest mit der Hand gekoppelt sind. Da weder kinematische Randbedingungen noch physikalische Aspekte berücksichtigt werden müssen, ist dieser Ansatz leicht zu implementieren und ermöglicht ein stabiles, sicheres Greifen. Ein kontrolliertes Ablegen gegriffener Körper ist jedoch schwierig, da die Aufhebung der Greifbedingungen nicht intuitiv steuerbar ist, was sich in einem störenden „Klebeffekt“ der Objekte an der Hand äußert. Logik-basierte Ansätze werden oft in Verbindung mit Datenhandschuhen ohne haptische Rückkopplung eingesetzt, da so trotz der fehlenden Rückkopplung ein in gewissen Grenzen intuitives Greifen ermöglicht wird. Implementierungen dieser Greifvariante wurden mehrfach beschrieben und von z. B. RIJPKEMA & GIRARD (1991), SANJO & THALMANN (1994),

REZZONICO ET AL. (1995), FURUSAWA ET AL. (1998), BUCK (1999), ZACHMANN (2000), ROSSGODERER (2002) sowie HUAGEN ET AL. (2004) vorgestellt.

### **Kinematik-basiertes Greifen**

Im Gegensatz zum Logik-basierten Greifen findet beim Kinematik-basierten Greifen keine feste Kopplung des Objekts mit der Handposition bzw. Handorientierung statt, sondern eine lose Kopplung, die im Rahmen bestimmter kinematischer Randbedingungen eine Feinmanipulation mit den Fingern zulässt. Das Aufnehmen der zu greifenden Objekte ist vergleichbar mit dem Logik-basierten Greifen und ist meist von einer bestimmten Anzahl an Kollisionen der Fingerspitzen mit dem zu greifenden Objekt abhängig. Wird die Greifbedingung erfüllt, so wird das Objekt als gegriffen definiert und kinematisch mit den einzelnen Fingerspitzen gekoppelt. Verändert sich im gegriffenen Zustand die Lage der Fingerspitzen relativ zueinander, so wird die Lage des gegriffenen Objekts entsprechend angepasst. Diese Greifvariante ist für Feinmanipulationen geeignet. Sie ist jedoch in der Flexibilität hinsichtlich der Griffarten eingeschränkt, da für eine eindeutige kinematische, statisch nicht über- oder unterbestimmte Kopplung genau drei Kontaktpunkte zulässig sind. Bei statisch überbestimmten Griffarten werden in der Regel nur drei ausgesuchte Kontakte verwendet oder Mittelungsverfahren eingesetzt. Mittelungsverfahren jedoch entkoppeln in gewisser Hinsicht die tatsächlichen Fingerbewegungen von den resultierenden Objektbewegungen, was eine intuitive und exakte Feinpositionierung mit den Fingerspitzen erschwert. Bekannte Kinematik-basierte Ansätze sind ähnlich wie Logik-basierte Ansätze meist in Systemen ohne haptische Interaktionsgeräte implementiert. Mehrere unterschiedliche Umsetzungen von Kinematik-basierten Ansätzen sind bekannt und wurden von KIJIMA & HIROSE (1995), BOULIC ET AL. (1996) sowie ULLMANN & SAUER (2000) beschrieben.

### **Physik-basiertes Greifen**

Physik-basiertes Greifen entspricht der Nachbildung des realen Greifvorgangs basierend auf den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die durch Masse- und Reibungseffekte gekennzeichnet sind. Dieser Ansatz stellt somit den flexibelsten, aber auch den berechnungstechnisch aufwändigsten zum virtuellen Greifen dar. Die Interaktion findet nur unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und Kontaktbedingungen zwischen der virtuellen Hand und den virtuellen Objekten statt. Keine weiteren vorab definierten logischen Bedingungen legen den Greifvorgang fest. Wirken durch die virtuelle Hand entsprechende Kräfte auf das zu greifende Objekt, so kann dieses bewegt, aufgenommen und durch die Hand fixiert werden. In Abhängigkeit der Stabilität der eingesetzten Kol-

lisionserkennung bzw. Physiksimulation können damit prinzipiell alle in Abbildung 3.2 dargestellten Griffvarianten umgesetzt werden. Eine besondere Herausforderung ist jedoch bei vielen Griffvarianten die Erfüllung des Kräftegleichgewichts. Dieses muss trotz mechanischer Überbestimmtheit bei mehr als drei Kontaktpunkten zu jedem Zeitpunkt des Greifvorgangs gewährleistet sein. In den meisten bekannten Ansätzen wird dieses Problem mittels mathematischer Optimierungsverfahren zur Berechnung und Gewichtung der Kontaktkräfte gelöst. Treten jedoch große Überschneidungen zwischen den virtuellen Fingern und dem gegriffenen Objekt auf, so ist die genaue Bestimmung der Kontaktpunkte und der dort herrschenden Kontaktkräfte nicht mehr eindeutig möglich, was zu Instabilitäten führt. Aus diesem Grund kann das Potenzial von Physik-basierten Greifverfahren vor allem im Zusammenhang mit haptischen Interaktionsgeräten voll ausgeschöpft werden, da diese Geräte die Kontaktkräfte an den Benutzer zurückkoppeln und damit die Überschneidungen an den Kontaktstellen gering gehalten werden.

Einen Beitrag dazu leisten BERGAMASCO ET AL. (1994) in Verbindung mit dem kraft-rückkoppelnden Handschuh, genannt HFF. Dabei wird der Greifvorgang in drei Schritte unterteilt:

- a) Berechnung der Kontaktzonen zwischen der virtuellen Hand und den Objekten des Szenegraphs,
- b) Bestimmung der Normalkräfte und der dynamischen Reibkräfte,
- c) Bestimmung der statischen Reibkräfte und der Greif-Stabilität (Gleichgewichtsbedingung für die Hand und das gegriffene Objekt).

Zur Berechnung der Kontaktzonen dienen sog. Kontrollpunkte auf der Innenseite der Handfläche und der Finger. Aus den Überschneidungen der Kontrollpunkte mit den Objekten werden Kollisionsvolumina abgeleitet, die die Grundlage für die weitere Kontaktkraftberechnung darstellen. Um die Richtungen der aus den Kollisionsvolumina resultierenden Kräfte zu berechnen, werden die entsprechenden einzelnen Kontrollpunkte zu einem übergeordneten Kontrollpunkt reduziert. Die orthogonale Projektion dieses reduzierten Kontrollpunkts auf die Oberfläche der virtuellen Hand bestimmt den Angriffspunkt und die Richtung der Kontaktkraft. Der Betrag der Normal-Kontaktkräfte wird gemäß dem Hook'schen Gesetz bestimmt. Die dynamischen Reibkräfte berechnen sich, basierend auf dem Coloumb'schem Gesetz, aus den Normalkräften und einem Reibkoeffizienten. Die statische Reibkraft dient als Ausgleichskraft, um den Greifvorgang zu stabilisieren. Diese Kraft wird so bestimmt, dass unter Berücksichtigung der Masse und des Trägheitstensors des gegriffenen Objekts die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsunterschiede an den Kontaktpunkten minimal werden. Dadurch wird eine stabile Manipulation der Objekte mit einem Physik-basierten realitätsnahen Verhalten ermöglicht.

Ein weiteres Verfahren zum Physik-basierten Greifen wird in TZAFESTAS & COIFFET (1997) und TZAFESTAS (2003) in Verbindung mit dem kraftrückkoppelnden Handschuh LRP-Dextrous Hand Master vorgestellt. Aus Performanzgründen wird die Handgeometrie für die Kollisionserkennung aus hierarchisch angeordneten Kugeln angenähert. Basierend auf den ermittelten Kontaktpunkten und Durchdringungstiefen werden die entsprechenden zum stabilen Greifen notwendigen Kontaktkräfte durch die Minimierung der Funktion  $\mathcal{F}$  der Gleichung 3.5 unter Berücksichtigung des Kräftegleichgewichts mit von außen aufgeprägten Kräften wie z. B. der Schwerkraft ermittelt. Die Gleichgewichtsfunktion  $\mathcal{F}$  umfasst die Anzahl der Kontakte  $n_c$ , die Kontaktkräfte  $\mathbf{f}_{ci}$ , die sog. „Squeezing Forces“  $\mathbf{f}_{si}$ , die sich aus der geometrischen Durchdringungstiefe des jeweiligen Kontakts ergeben, und den Oberflächennormalen der Kontaktstellen  $\mathbf{a}_{ci}$ :

$$\mathcal{F} = (1/2) \sum_{i=1}^{n_c} |\mathbf{f}_{ci} - \mathbf{f}_{si} \cdot \mathbf{a}_{ci}|^2 \rightarrow \min \quad (3.5)$$

HIROTA ET AL. (1999) beschreiben einen Ansatz, der mehrere Kontaktpunkte pro Finger, abgebildet als sogenannte God-Objects (ZILLES & SALISBURY 1995), in Verbindung mit einem Reibmodell für Haft- und Gleitreibung zum Greifen verwendet. Die Bewegung des gegriffenen Objekts wird durch die auf das Objekt aufgeprägten Kräfte bestimmt und unter Berücksichtigung der Schwerkraft durch die Integration der beschreibenden Bewegungsgleichungen nach dem Euler-Verfahren berechnet. Dadurch ist es möglich, mit zwei virtuellen Fingerspitzen (mit Krafrückkopplung) oder einer Drei-Finger-Interaktion mit einem Datenhandschuh (ohne Krafrückkopplung) realitätsnahes Physik-basiertes Greifen zu leisten. Dieses Konzept wird in HIROTA & HIROSE (2003) zu einem Point-Shell-Konzept für fünf Finger erweitert, wodurch eine bis auf die Handfläche vollständige virtuelle Hand abgebildet werden kann.

Des Weiteren wird in JAYARAM ET AL. (1999a) für das Montagesimulationssystem VADE ein Physik-basierter Ansatz zum Greifen beschrieben. Nach Angaben der Autoren werden die Reibbedingungen an den Kontaktstellen Haut/Objekt berücksichtigt, was die Feinmanipulation der gegriffenen Objekte ermöglicht. Der zugrundeliegende Algorithmus wird jedoch nicht näher spezifiziert.

Ein spezielles Verfahren, das Greifen mit zwei Fingern realitätsnah abbildet, wird „Soft-Finger Grasping“ genannt und von BARBAGLI ET AL. (2003) und DE PASCALE ET AL. (2005) beschrieben. Die Besonderheit dieses Physik-basierten Verfahrens liegt in der Einführung eines Reibmoments für punktförmige Kontakte, wodurch die Eigenschaften der menschlichen Finger nachgebildet werden. Dies gilt besonders für den Pinzettengriff, mit dem Momente auf den gegriffenen Körper übertragen werden können.

### Zusammenfassung der Greifverfahren

Tabelle 3.1 stellt die vorgestellten Ansätze zusammenfassend dar. Die Spalte *Greifalgorithmus* bezieht sich auf die zugrundeliegenden Algorithmen zur Durchführung des Greifvorgangs, wobei prinzipbedingt nur die kinematischen bzw. physikalischen Ansätze eine Feinmanipulation der gegriffenen Objekte zulassen. Die Spalte *Anzahl der Finger* steht für die Anzahl der Finger, die beim Greifvorgang mit einbezogen werden. Die Spalte *Handfläche* kennzeichnet, ob die Handfläche für die Berechnung des Greifvorgangs mit berücksichtigt wird. Die Spalte *haptische Rückkopplung* bezieht sich auf die Ausgabe von Kraftsignalen auf die Finger, da bei keinem untersuchten Fall das haptische Interaktionsgerät die Ausgabe von Kraftsignalen auf die Handfläche unterstützt.

Quelle	Greifalgorithmus			Anzahl der Finger	Handfläche	haptische Rückkopplung
	Logik-basiert	Feinmanipulation				
		Kinematik-basiert	Physik-basiert			
RUPKEMA & GIRARD (1991)	●	○	○	5	○	○
BERGAMASCO ET AL. (1994)	○	○	●	5	●	●
SANSO & THALMANN (1994)	●	○	○	5	⊗	○
KIJIMA & HIROSE (1995)	○	●	●	3/1	○	○
REZZONICO ET AL. (1995)	●	○	○	5	○	○
BOULIC ET AL. (1996)	○	●	○	5	●	○
FURUSAWA ET AL. (1998)	●	○	○	5	○	○
BUCK (1999)	●	○	○	2	○	○
HIROTA ET AL. (1999)	○	○	●	2/3	○	●
JAYARAM ET AL. (1999a)	○	○	●	5	⊗	●
ULLMANN & SAUER (2000)	○	●	○	5	●	○
ZACHMANN (2000)	●	○	○	5	●	○
ROSSGODERER (2002)	●	○	○	5	○	○
BARBAGLI ET AL. (2003)	○	○	●	2	○	●
HIROTA & HIROSE (2003)	○	○	●	5	○	○
TZAFESTAS & COIFFET (1997), TZAFESTAS (2003)	○	○	●	5	○	●
HUAGEN ET AL. (2004)	●	○	○	5	○	○
DE PASCALE ET AL. (2005)	○	○	●	2	○	●

Tabelle 3.1: Aufstellung der Ansätze zur direkten Handinteraktion; Einstufung der Kriterien: ● erfüllt, ● teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt, ⊗ keine Angaben

Die Auswahl des optimalen Greifverfahrens im Hinblick auf eine realitätsnahe IMS ist maßgeblich von den Eigenschaften des Handinteraktionsgeräts abhängig. Bei Handein-



gabegeräten ohne Kraftrückkopplung bieten sich Logik-basierte und Kinematik-basierte Verfahren an. Diese können hinsichtlich der Handstellung beim Greifen fehlertolerant ausgelegt werden. So gewährleisten sie auch ohne Kraftrückkopplung und bei unpräzisen Handbewegungen ein stabiles Greifen. Allerdings ist keine oder zumindest nur eine eingeschränkte Feinmanipulation mit störenden künstlichen Nebeneffekten bei der gezielten Objekt-handhabung möglich. Steht ein geeignetes kraftrückkoppelndes Handinteraktionsgerät zur Verfügung, das dem Benutzer eine präzise Kontrolle der Kontaktsituation zwischen der Hand und dem Objekt ermöglicht, so überwiegen im Hinblick auf eine realitätsnahe Objektmanipulation unter Berücksichtigung von Masse- und Reibeffekten die Vorteile eines Physik-basierten Ansatzes.

## 3.3 Handinteraktionsgeräte

### 3.3.1 Allgemeines

Für die direkte Handinteraktion mit der virtuellen Umgebung sind geeignete Eingabegeräte von zentraler Bedeutung. Diese müssen es ermöglichen, die Stellungen und Bewegungen der einzelnen Finger und der Hand im Raum präzise und schnell zu erfassen und ggf. Kontaktkräfte an den Benutzer zurückkoppeln. Nur so ist die technische Umsetzung intuitiver und realitätsnaher Greifalgorithmen für die Manipulation virtueller Objekte gewährleistet. Eine Reihe unterschiedlicher technischer Ansätze wurden zur Realisierung von Handinteraktionsgeräten verfolgt. Für die Implementierung einer IMS-Umgebung mit direkter Handinteraktion kommen je nach angestrebtem Greifverfahren (siehe Abschnitt 3.2.5) Sensorhandschuhe ohne Kraftrückkopplung und verschiedene Varianten haptischer Handinteraktionsgeräte in Betracht. Dabei sind vor allem tragbare und bodengebundene Varianten zu unterscheiden, da tragbare Systeme zwar einen größeren Arbeitsraum ermöglichen, aufgrund der fehlenden Erdung des Kraftflusses aber keine festen Begrenzungen wie z. B. eine feste Montageunterlage haptisch darstellen können.

### 3.3.2 Sensorhandschuhe

Wie schon in Abschnitt 2.3.3 überblicksartig beschrieben, dienen Sensorhandschuhe zur Messung der Finger- und Handstellung. Einige Sensorhandschuhe können noch zusätzlich mit Aktoren zur Erzeugung taktiler Informationen an den Fingerspitzen nachgerüstet werden. Da es dadurch nicht möglich ist, gerichtete Kraftinformationen an den Benutzer zurückzukoppeln, ist der Einsatz von Sensorhandschuhen in der IMS nur bedingt und nur in Verbindung mit Logik-basierten oder Kinematik-basierten Greifalgorithmen (siehe

Unterabschnitt 3.2.5) möglich.

Die Qualität der Messung der realen aktuellen Finger- und Handstellung und damit auch die Qualität der Abbildung der virtuellen Hand werden von der Art und der Anzahl der eingesetzten Sensoren bestimmt. Nach aktuellem Stand der Technik sind Varianten mit zwei bis 22 einzelnen Sensoren verfügbar. Die am häufigsten eingesetzten Sensoren zur Messung der Fingerwinkel sind optische oder widerstandsabhängige Biegesensoren. Mechanische Trackingverfahren sind aufgrund der notwendigen komplexen Mechanismen sehr selten, obwohl diese eine hohe Messgenauigkeit ermöglichen. Zur Erfassung der räumlichen Position und Orientierung der Hand sind zusätzlich 3-D-Positionserfassungsgeräte (siehe Unterabschnitt 2.3.3) erforderlich. Bei vielen kommerziellen Varianten sind umfangreiche Softwarepakete zur Konfiguration und Integration der Sensorhandschuhe in weitere Anwendungen erhältlich. Zusammenfassend sind die untersuchten Sensorhandschuhe für die IMS mit Angaben über Masse, Anzahl der Sensoren, Messauflösung und Messverfahren in der Tabelle 3.2 aufgelistet.

Bezeichnung	verfüglich	Masse	Anzahl der Sensoren	Sensorauf- lösung	Messver- fahren
5DT Glove Ultra (FIFTHDIMENSION 2006)	ja	k.A.	5/14	12 Bit	opt. Biegesensoren
CyberGlove® II (IMMERSON 2006)	ja	k.A.	18/22	0,5°	Widerstandsbiegesensoren
DG5-VHand (DGTECH 2006)	ja	k.A.	5	10 Bit	Biegesensoren
Exos(Utha/MIT) Dextrous Hand Master (ROHLING & HOLLERBACH 1993)	nein	k.A.	16	0,1°	Hall-Effekt
P5™ Glove (VIDEOGAMEALLIANCE 2006)	ja	128 g	5	0,5°	Biegesensoren
Pinch® Glove (FAKESPACE 2006)	ja	k.A.	5	1 Bit	Kontaktsensoren
ShapeHand™/ShapeClaw™ (MEASURAND INC. 2006)	ja	k.A.	2/5	k.A.	Biegesensoren
X-IST DataGlove (NODNA 2006)	ja	100 g	10/14	10 Bit	Biegesensoren/Kontaktsensoren (max. 5 Stck.)

Tabelle 3.2: Eigenschaften der untersuchten Sensorhandschuhe

### 3.3.3 Tragbare haptische Handinteraktionsgeräte

Bei den bekannten tragbaren haptischen Handinteraktionsgeräten (siehe Tabelle 3.3) wurde bisher das Prinzip der Kraftübertragung mittels Seilzügen in Verbindung mit einem

Bezeichnung	verfügbar	Masse	Anzahl der Sensoren	Messverfahren	Anzahl der Aktoren	max. Kraft/Moment	kont. Kraft/Moment	Kraftauflösung	Kraftübertragung
CyberGrasp <sup>TM</sup>	ja	350	22	Biege-sensoren	5	k.A.	12 N	12 Bit	Exoskelett / Seilzüge
HFF	nein	k.A.	12+24	Konduktion/Dehnmessstreifen	12	k.A.	k.A.	k.A.	Exoskelett / Seilzüge
LRP-DHM	nein	k.A.	14+14	opt. Dekoder/Dehnmessstreifen	14	k.A.	0,12 Nm	k.A.	Exoskelett / Seilzüge
Rutgers Master II	nein	70	k.A.	k.A.	4	16,4 N	4 N	0,05 N	Pneumatik
Rutgers Master II-ND	nein	80	8+4	Hall-Effekt / Infrarot	4	16 N	16 N	12 Bit	Pneumatik

Tabelle 3.3: Eigenschaften tragbarer haptischer Handinteraktionsgeräte

möglichst leichten Exoskelett am häufigsten umgesetzt. Jedoch das einzige in diesem Bereich kommerziell erhältliche Produkt ist der *CyberGrasp<sup>TM</sup>* (IMMERSSION 2006). Die Gelenkwinkel werden mittels des zusätzlich erforderlichen Sensorhandschuhs *CyberGlove<sup>®</sup>* (22 Sensoren) ermittelt, woraufhin die daraus resultierenden Kräfte über Seilzüge mit fünf Aktoren auf alle Finger getrennt übertragen werden. Dabei sind die Fingerspitzen mittels Schlaufen direkt mit den Seilzügen verbunden. Die Seilzüge werden über ein Exoskelett, das an den Fingern und am Handrücken befestigt ist, abgestützt und zu den Fingerspitzen geführt. Die fünf Aktoren sind in einer separaten Aktoreinheit, die ggf. in einem Rucksack mitgeführt werden kann, zusammengefasst. Im Gegensatz dazu beschreiben AVIZZANO ET AL. (2000) ein ebenfalls auf einem Exoskelett mit Seilzügen basierendes System, genannt HFF (Hand Force Feedback System), das zwar nur vier Finger unterstützt, jedoch mit insgesamt 12 Aktoren jedes Fingergelenk einzeln ansteuern kann. Mittels 12 integrierter auf Konduktionseffekten basierender rotatorischer Sensoren und 24 integrierter Dehnmessstreifen werden die Gelenkwinkel und die auf die Finger wirkenden Kräfte gemessen. Dadurch ist ein positions- oder kraft geregelter Betrieb des Geräts möglich. Da die Aktoren direkt auf dem Handrücken platziert sind, lässt sich ein relativ hohes Tragewicht vermuten. Ein weiterer Ansatz eines haptischen Handschuhs, basierend auf einem Exoskelett mit Seilzügen namens LRP (Dextrous Hand Master), wird von TZAFESTAS &

COIFFET (1997) sowie TZAFESTAS (2003) vorgestellt. Die Drehmomente können dabei unabhängig voneinander mittels 14 Aktoren auf die Gelenke aller fünf Finger aufgebracht werden, wobei beim Daumen nur die zwei äußersten Gelenke angesteuert werden. Die Aktoren sind im Gegensatz zum HFF nicht direkt auf der Hand angebracht, sondern in einer separaten Aktoreinheit zusammengefasst. Mit Hilfe von 14 integrierten optischen Dekodern zur Winkelmessung und der 14 integrierten Sensoren zur Messung der Seilspannung ist wie beim HFF ein positions- bzw. kraftgeregelter Betrieb möglich. Einen vollständig anderen technischen Realisierungsansatz für haptische Handinteraktionsgeräte verfolgen FABIANI ET AL. (1996), RICHARD & COIFFET (1999) sowie BOUZIT ET AL. (2002) mit dem *Rutgers Master II* bzw. dem *Rutgers Master II-ND*. Über jeweils vier pneumatische Aktoren, die auf der Handinnenfläche angebracht sind, können auf die Fingerspitzen des Daumens, des Zeigefingers, des Mittel- und des Ringfingers bis zu 16 N aufgebracht werden. Die Vorteile dieses alternativen Konzepts liegen in der geringen Masse von 70 g bzw. 80 g, wobei noch weitere ca. 105 g für Kabel und Schläuche zum Kompressor und zur Steuereinheit anfallen. Die Nachteile im Vergleich mit den Exoskelett-basierten Ansätzen liegen wegen der geringeren Systemsteifigkeit durch den pneumatischen Ansatz zum einen in einer geringen Bandbreite, zum anderen kann die Hand wegen der Aktoren in der Handinnenfläche nur etwa zur Hälfte geschlossen werden. Umfassungsgriffe schlanker Körper können dadurch in der virtuellen Umgebung nicht abgebildet werden. Hinsichtlich der eingesetzten Sensorik ist der Rutgers Master II auf einen zusätzlichen Sensorhandschuh angewiesen. Bei dem weiterentwickelten Rutgers Master II-ND sind insgesamt acht Hall-Effekt-Sensoren zur Winkelmessung in den vier Aufhängungen der Pneumatikzylinder integriert. Die lineare Längenänderung der Pneumatikzylinder wird mittels jeweils einem integrierten Infrarotsensor bestimmt.

#### 3.3.4 Bodengebundene haptische Handinteraktionsgeräte

Die technischen Ausführungen bodengebundener haptischer Handinteraktionsgeräte (siehe Tabelle 3.4) sind im Gegensatz zu den tragbaren Varianten sehr unterschiedlich. Das einzige kommerziell erhältliche System ist der *CyberForce*<sup>®</sup> (IMMERSION 2006), der kein eigenständiges Handinteraktionsgerät darstellt, sondern ausschließlich als Ergänzung des *CyberGrasp*<sup>TM</sup> (siehe Unterabschnitt 3.3.3) dient. Durch den *CyberForce*<sup>®</sup> können mittels dreier Aktoren Kräfte von bis zu 8,8 N, jedoch keine Momente auf den Benutzer übertragen werden. Die Übertragung von Momenten ist nicht möglich. Die sechs Bewegungsfreiheitsgrade des Arms werden von sechs Sensoren erfasst, wodurch der Arm gleichzeitig als 3-D-Positionserfassungssystem dient und eine Positionsregelung ermöglicht. Unter dem Markennamen *Haptic Workstation*<sup>TM</sup> wird ein Aufbau vertrieben, der zwei *CyberForce*<sup>®</sup> und zwei *CyberGrasp*<sup>TM</sup> zur beidhändigen Interaktion mit einem HMD

Bezeichnung	verfüglich	Masse	Anzahl der Sensoren	Messverfahren	Anzahl der Aktoren	max. Kraft/Moment	kont. Kraft/Moment	Kraftauflösung	Kraftübertragung
CyberForce <sup>®</sup>	ja	-	6	k.A.	3	8,8 N	6,6 N	k.A.	starre Kinematik
Hiro	nein	-	4	Kraftsensoren/ opt. Tracking	15	17,7 N	k.A.	k.A.	inverse Roboterhand
SPIDAR-8	nein	-	24	k.A.	24	k.A.	k.A.	k.A.	Seilzüge

Tabelle 3.4: Eigenschaften bodengebundener haptischer Handinteraktionsgeräte

kombiniert. Dieses System repräsentiert damit das haptische kommerzielle Handinteraktions-System mit dem höchsten Immersionsgrad. Im Gegensatz dazu stellen KAWASAKI ET AL. (2003) sowie ALHALABI ET AL. (2004) ein bodengebundenes Gerät namens *HIRO* vor, das eine inverse Roboterhand mit Arm darstellt und Kräfte auf die Fingerspitzen des Daumens, des Zeige- und des Mittelfingers aufbringen kann. Der Benutzer ist dabei durch eine Art Fingerhut mit den Fingerspitzen der Roboterhand, die bei Bewegungen mit der menschlichen Hand mitgeführt wird, verbunden. Der Roboterarm kann über sechs Gelenke sechs Kraft- und Momenten-Freiheitsgrade und sechs Bewegungsfreiheitsgrade realisieren. Position und Orientierung des Roboterarms werden mittels eines externen optischen 3-D-Positionserfassungssystems bestimmt. Über drei Aktoren je Roboterfinger können maximale Kräfte von 17,7 N an den Benutzer übertragen werden. Das System verfolgt einen Kraft-basierten Regelungsansatz, wozu jeweils ein 3-D-Kraftsensor im proximalen Fingerglied eines Roboterfingers die notwendigen Kraftinformationen liefert. Ein technisches Konzept, das für die Kraftübertragung auf steife Strukturen wie z. B. Exoskelette oder Roboterhände verzichtet, stellt *SPIDAR* dar. Dabei steht *SPIDAR* für die Entwicklung einer ganzen Reihe von bodengebundenen haptischen Handinteraktionsgeräten, die schon seit Ende der 80ziger Jahren begonnen hat. Die Besonderheit dieser Geräte ist, dass die Kräfte über Seile, die von den Fingerspitzen aus zu einem Rahmen gespannt sind, auf den Benutzer übertragen werden. Dies schränkt einerseits den Arbeitsraum stark ein, andererseits jedoch wirken auf den Benutzer keine störenden massebedingten Kräfte des Interaktionsgeräts. Inzwischen wurden die Varianten *SPIDAR*, *SPIDAR II*, *Both Hand SPIDAR*, *BIG SPIDAR*, *SPIDAR-G* und *SPIDAR-8* entwickelt (ISHII & SATO 1993, WALAIRACHT ET AL. 1999, KOHNO ET AL. 2001, SATO 2002, MURAYAMA ET AL.

2004). Die momentan am weitesten entwickelte Variante SPIDAR-8 ist für den beidhändigen Gebrauch ausgelegt und unterstützt insgesamt acht Finger. Jede Fingerspitze ist dabei mit drei Seilzügen angebunden, wodurch für den positionsgeregelten Betrieb von SPIDAR-8 insgesamt 24 Aktoren und 24 Sensoren erforderlich sind.

## 3.4 Kraftberechnung

### 3.4.1 Allgemeines

In einer Physik-basierten IMS mit kraftrückkoppelnden Eingabegeräten stehen alle Simulationsobjekte – einschließlich der Benutzer – über Kräfte miteinander in Beziehung. Die effiziente, stabile und physikalisch plausible Berechnung der gegenseitigen Interaktionskräfte und das daraus resultierende Objektverhalten sind für eine aussagekräftige Simulation entscheidend. Die wesentlichen Schritte für eine Kraftberechnung sind dabei in Abbildung 3.6 aufgezeigt. Beginnend mit der Kollisionserkennung werden die statischen Überschneidungen bzw. Kontakte zwischen den Objekten bestimmt, die zu einer Beschreibung der statischen Kontaktsituation mittels der Oberflächennormalen der Objektoberflächen an den Kontaktstellen, den Durchdringungstiefen und/oder den Kollisionsvolumina führen. In dem nächsten Schritt werden, basierend auf den Kontaktinformationen, unter Berücksichtigung des aktuellen Objektzustandes, von einer Physiksimulation die entsprechenden Reaktionskräfte berechnet. Parallel dazu werden die Kontaktinformationen in die entsprechenden Kräfte übersetzt, was als haptisches Rendering bezeichnet wird. Die berechneten Kräfte werden an den Benutzer weitervermittelt. Durch die auf die Objekte bzw. den Benutzer wirkenden Kräfte verändern sich entsprechend die Positionen und Orientierungen, was wiederum zu neuen Kollisionsergebnissen und damit veränderten Kontaktsituationen führt.

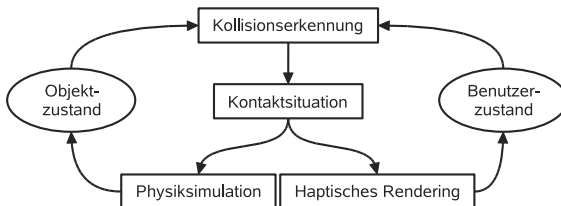


Abbildung 3.6: Simulationskreislauf in der Physik-basierten IMS mit kraftrückkoppelnden Eingabegeräten

### 3.4.2 Kollisionserkennung

Als Ausgangspunkt für die Kraftberechnung dient die Kollisionserkennung, wodurch Informationen über die gegenseitige Lage und Durchdringung der Objekte einer virtuellen Szene berechnet werden. Da die Kollisionserkennung in vielen Anwendungsbereichen eine wichtige Rolle spielt, wie z. B. in der automatischen Pfadplanung für Roboter, für CAD-Anwendungen, für 3-D-Animationen und für Computerspiele, wurde dieser Bereich schon intensiv erforscht. Einen allgemeinen Überblick über den Stand der Technik bei der Kollisionserkennung geben u. a. LIN & GOTTSCHALK (1998), ECKSTEIN (1999), ZACHMANN (2000), BANERJEE & ZETU (2001), STEFFAN (2001), REGGIANI ET AL. (2002) und VAN DEN BERGEN (2004).

Die geometrische Modellbeschreibung hat einen großen Einfluss auf die Performanz der Kollisionserkennung. Die verschiedenen Varianten heute üblicher geometrischer Beschreibungen von 3-D-Modellen sind in Abbildung 3.7 zu sehen. Ausreichend effiziente Verfahren für Echtzeitanwendungen und deren Implementierungen existieren inzwischen hauptsächlich für polygonale Modelle. Ausnahmen sind durch Voxel-basierte Modelle und Modelle mit parametrischen Oberflächen gegeben.

Eine zentrale Herausforderung bei der Kollisionserkennung ist die Beherrschung der Komplexität der Kollisionsberechnung mehrerer Objekte bzw. Polygone. Der paarweise Test aller Kollisionsobjekte einer virtuellen Szene würde  $n(n-1)/2$  einzelne Tests erfordern, was einer Komplexität von  $O(n^2)$  entspricht und nur bei sehr geringen Objekt- bzw. Polygonzahlen praktikabel ist. Aus diesem Grund verwenden moderne Kollisionserkennungsalgorithmen entweder einzeln oder in Kombination folgende Strategien, um die Anzahl der erforderlichen Tests zu reduzieren, bevor die genauen Kontaktpunkte ermittelt werden:

- Hüllkörperstrategien,
- Unterteilungsstrategien oder
- Kohärenzstrategien.

Durch Kollisionstests mit Hüllkörpern werden die Objekte einer Szene effizient gefunden, die sich tatsächlich überschneiden könnten, ohne die genaue Geometrie der Objekte überprüfen zu müssen. Objekte, deren Hüllkörper sich nicht überschneiden, werden demnach nicht weiter betrachtet. Hüllkörper werden in verschiedenen geometrischen Ausprägungen verwendet und können z. B. Kugeln, Kegel oder Ellipsoide sein. Aufgrund der einfachen mathematischen Beschreibung sind Hüllkörper jedoch meist quaderförmig. Sie sind gemäß des zu umhüllenden Objekts im Raum als Object Oriented Boundingbox (OBB) oder gemäß der Koordinatenachsen des Weltkoordinatensystems als Axis Aligned Boundingbox (AABB) orientiert. Hüllkörper können dabei das gesamte Objekt umfassen und/oder

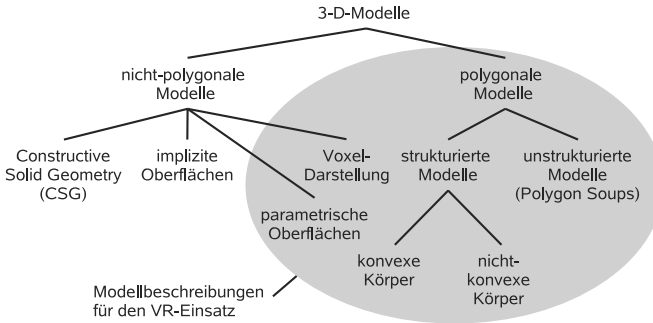


Abbildung 3.7: Einteilung der geometrischen Modellbeschreibung, angelehnt an LIN & GOTTSCHALK (1998) mit dem Schwerpunkt auf Beschreibungsformen für VR-Anwendungen

weiter unterteilt sein, um die geometrischen Eigenschaften des jeweiligen Objekts besser anzunähern. Eine weitere Strategie zur Reduktion der einzelnen Kollisionstests besteht in der Raumteilung in einzelne Parzellen, was als Binary Space Partitioning (BSP) bezeichnet wird. Erst wenn zwei Objekte die selbe räumliche Einheit belegen, findet eine Kollisionsüberprüfung auf der Objektebene statt. Viele Verfahren benutzen auch die räumliche oder zeitliche Kohärenz der Szenen. Diese Vorgehensweise basiert darauf, dass sich während eines Simulationsschritts die Lage und Orientierung der Objekte nur geringfügig ändert. Bei einer speziellen Variante der Verwendung der räumlichen Kohärenz wird nur die Existenz einer eindeutigen Trennebene zwischen den Objekten überprüft. Wenn diese nicht mehr existiert, wird versucht, eine neue Trennebene zu finden. Erst wenn dies aufgrund der stattgefundenen Objektkollision nicht mehr möglich ist, wird die genaue Berechnung des Kontakts bzw. der Durchdringung zwischen zwei Objekten durchgeführt. Bei der Verwendung der zeitlichen Kohärenz dienen die Ergebnisse des vorhergegangenen Berechnungsschrittes als Ausgangspunkt für die aktuelle iterative Kollisionsprüfung, was ebenfalls einen beschleunigenden Effekt hat. Wird durch eine Kollision auf übergeordneter Ebene eine Objektkollision vermutet, kommen im zweiten Schritt Verfahren zur genauen Bestimmung der Überschneidung bzw. des Kontaktpunktes zum Einsatz. Dieser Schritt ist für die Kraftberechnung von entscheidender Bedeutung, da erst jetzt in einem ausreichend genauen Maß die Oberflächennormalen an den Kontaktpunkten und die Durchdringungstiefen bzw. Kollisionsvolumina bestimmt werden können. Dabei unterscheidet man, aufsteigend nach der Reihenfolge der Einsatzhäufigkeit im VR-Bereich sortiert, NURBS-Verfahren, Punktverfahren, Voxelverfahren und Polygonverfahren.



## NURBS-Verfahren

Auf NURBS basierende Verfahren zur Kollisionserkennung sind in der Lage, Oberflächen exakt zu beschreiben. So können viele durch die annähernde Zergliederung der Geometrien in Polygone, Kontrollpunkte oder Voxel entstehende Probleme umgangen werden. Der Informationsverlust hinsichtlich Toleranzen und Geometriebeschreibung im Austausch mit CAD-Systemen kann dadurch ebenfalls wesentlich verringert werden. Die aktuell noch größte Limitierung trotz der potentiellen Vorteile stellt jedoch der hohe Rechenaufwand dar, der einen Einsatz für eine Echtzeitanwendung sehr stark begrenzt. In virtuellen Umgebungen bekannte Verfahren beschränken sich demnach darauf, nur einzelne Punkte auf Kollisionen bzw. Durchdringungen der durch NURBS beschriebenen Oberflächen zu berechnen. Die Bestimmung der Kollision zweier oder mehrerer räumlich ausgedehnter durch NURBS beschriebener Körper ist mit den heutigen iterativen Verfahren noch nicht in Echtzeit möglich.

THOMPSON II ET AL. (1997) und HOLLERBACH ET AL. (2000) beschreiben, basierend auf NURBS, einen der wenigen Ansätze einer Kollisionserkennung für ein haptisches Rendering. Zur Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit wird die Kollisionsberechnung in drei Schritten durchgeführt. In einem ersten Schritt wird mittels eines Boundingbox-Verfahrens der potentielle Kontaktbereich eingegrenzt. Im zweiten Schritt dient ein polygonales Kontrollnetz für die weitere lokale Eingrenzung des Kontaktbereichs und erst im dritten Schritt wird iterativ der Kontakt auf der NURBS-Oberfläche bestimmt.

## Punkt- und Voxelverfahren

Der Vorteil von Punktwolkenverfahren ist eine schnelle und effiziente Kollisionserkennung, da nur Punkte gegen räumlich ausgedehnte Objekte berechnet werden müssen, nicht jedoch Überschneidungen von Flächen, wie bei Polygon-basierten Verfahren. Nachteilig ist jedoch die mangelnde Flexibilität, da nur jeweils eine, ein bewegtes räumliches Objekt darstellende Punktwolke in einer sonst statischen Szene effizient berechnet werden kann. Bei mehreren bewegten Objekten ist eine größere Zunahme des Rechenaufwandes im Gegensatz zu Polygon-basierten Verfahren zu verzeichnen.

Diesem Nachteil zufolge stellen Punktwolkenverfahren, wie z. B. von HIROTA & HIROSE (2003) präsentiert, die Ausnahme dar. Eine weitere Variante zur Kollisionserkennung einer virtuellen Hand mit Hilfe einer Punktwolke wird von BERGAMASCO ET AL. (1994) beschrieben, die dieses Verfahren mit der polygonalen Darstellung der restlichen Elemente aus der virtuellen Szene verbinden.

Basierend auf einem Verfahren von TURK (1992), stellt ZACHMANN (2000, S. 121) ebenfalls einen weiteren Ansatz vor, mit dem polygonisierte Objekte auf Kollisionen mit Punkt-

wolken überprüft werden können. TURK (1992) beschreibt dabei ursprünglich ein Verfahren zur automatisierten Polygonreduktion. Das Verfahren dient zur Polygonreduktion mit einem geringen Informationsverlust hinsichtlich der Oberflächentopologie des Ausgangskörpers. Als Zwischenschritt werden jedoch markante Oberflächenpunkte bestimmt, die sehr gut für auf Punktwolken basierende Kollisionserkennungsalgorithmen eingesetzt werden können.

Voxelverfahren teilen den Raum in ein dreidimensionales Gitter ein. Belegen zwei Objekte den selben Gitterplatz, so ist dies der Indikator für eine Kollision. Durch diese Vorgehensweise erreichen Voxel-basierte Verfahren eine extrem schnelle und effiziente, mit Punktwolkenverfahren vergleichbare Kollisionserkennung. Nachteilig wirkt sich der im Vergleich zu Polygon-basierten Verfahren wesentlich höhere Speicherbedarf aus, da für die Kollisionserkennung der Raum in ein feingliedriges Gitter unterteilt werden muss. Je feingliedriger dabei die Unterteilung ist, desto genauer kann die Geometrie der Objekte in der Kollisionserkennung angenähert werden. Ein weiterer Nachteil besteht, ähnlich wie bei den Punktwolkenverfahren, in der geringeren Flexibilität von Voxel-basierten Ansätzen. Diese bilden zwar statische Szenen mit nur einem bewegten Objekt sehr gut ab, bei mehreren dynamischen Objekten ist allerdings ein höherer Berechnungsaufwand zu verzeichnen. Dies resultiert aus der Vielzahl von Gitterplätzen, die hinsichtlich der sich ständig ändernden Objektpositionen aktualisiert werden müssen. Im Bereich der IMS werden Voxelverfahren, so wie Punktwolkenverfahren auch, selten eingesetzt, da die meisten Szenarien aus mehreren dynamischen Objekten zusammengesetzt sind. Einen möglichen Lösungsansatz aus der Luftfahrtindustrie schlagen MCNEELY ET AL. (1999) für die Kollisionserkennung bei sehr großen Modellen vor.

Ein weiterer Einsatz einer Voxel-basierten Kollisionserkennung ist von SAVALL ET AL. (2002) bekannt. Sie setzen das Verfahren für die haptische virtuelle Montage/Demontage-Simulation von Flugzeugtriebwerken unter Anwendung von Modellen mit mehr als 2 Mio. Polygonen ein. Update-Raten der Kollisionsrechnung zwischen 10 Hz und 100 Hz können dadurch erreicht werden. Die statische Szene wird dabei aus Voxeln dargestellt, die gegen einen haptischen Interfacepunkt berechnet werden.

Um realitätsnahes Greifen mit einer virtuellen menschlichen Hand zu realisieren, verwenden HUAGEN ET AL. (2004) einen modifizierten auf MCNEELY ET AL. (1999) zurückgehenden Ansatz. Es wird dabei versucht, das Problem aufzulösen, dass das ursprüngliche Verfahren nur die Manipulation eines relativ einfachen dynamischen Körpers in einer fast beliebig komplexen, aber statischen Umgebung darstellen kann. HUAGEN ET AL. (2004) erweitern das Verfahren, um Szenen mit mehreren dynamischen Körpern auf Kollisionen überprüfen zu können. Dafür wird jedem Voxel eine eindeutige ID des Körpers zugewiesen, der diese Voxel belegt. Verändert sich die Lage des Körpers, so wird die ID der Voxel

entsprechend angepasst. Die Fingerspitzen der virtuellen Hand sind für die Kollisionsrechnung als zufällig verteilte Punkte auf der Handinnenseite der Fingerspitzen abgebildet.

## Polygonverfahren

Im Gegensatz dazu sind die meisten in interaktiven Echtzeitanwendungen eingesetzten Verfahren zur Kollisionserkennung Polygon-basiert. Die zwei den meisten Kollisionserkennungsimplementierungen zugrunde liegenden Algorithmen sind der Gilbert-Johnson-Keerthi-(GJK)-Algorithmus (GILBERT ET AL. 1988) und der Lin-Canny-Closest-Feature-(LC)-Algorithmus (LIN & CANNY 1991). Gemäß VAN DEN BERGEN (2004, S. 252) bauen sogar alle bekannten Algorithmen zur inkrementellen Kollisionserkennung konvexer Objekte auf den Grundlagen dieser beiden Algorithmen auf.

Der LC-Algorithmus berechnet die Entfernung zweier räumlich getrennter Polyeder und gilt allgemein als der schnellste Algorithmus für dieses Problem. Die konvexen Polyeder werden in sog. Features zerlegt, die Punkte, Kanten oder Flächen darstellen können. Der Algorithmus verfolgt und speichert zwischen den zeitlichen Schritten die am nächsten zusammenliegenden Features. Davon ausgehend kann die kürzeste Distanz zwischen den Körpern berechnet werden. Auf zwei entscheidende Nachteile verweist MIRTICH (1998): Der Algorithmus berücksichtigt nicht die Durchdringung zweier Polyeder, was die Berechnung des exakten Kollisionspunktes erschwert. Zudem ist der Algorithmus bei geometrisch degenerierten Modellen, z. B. bei sehr schmalen Polygonen mit sehr kleinen Eckenwinkeln, anfällig für zyklisches Verhalten, so dass keine Lösung gefunden werden kann. Der LC-Algorithmus findet sich als grundlegender Algorithmus in vielen Implementierungen von Kollisionserkennungsbibliotheken wieder: so z. B. in I-COLLIDE (COHEN ET AL. 1995), in RAPID (GOTTSCHALK ET AL. 1996), in V-COLLIDE (HUDSON ET AL. 1997), in V-Clip (MIRTICH 1997) oder in H-Collide (GREGORY ET AL. 1999).

Der GJK-Algorithmus ist dagegen ein Simplex-basiertes Verfahren, um die Entfernung zweier Polyeder oder deren Durchdringungstiefe zu berechnen. Die Durchdringungstiefe ist dabei die geringste Entfernung, die von einem der beiden kollidierenden Polyeder zurückgelegt werden muss, um nur noch im berührenden Kontakt zu sein. Ein Simplex ist die konvexe Hülle einer affin unabhängigen Punktmenge. Er ist im Falle von ein, zwei, drei oder vier Punkten selbst ein Punkt, ein Geradenstück oder ein Dreieck bzw. ein Viereck. Zur Berechnung der Entfernung bzw. der Durchdringungstiefe sucht der Algorithmus nach dem Simplex, der durch die Punkte der Minkowski-Differenz (VAN DEN BERGEN 2004, S. 33–38) der beiden Polyeder definiert ist und den geringsten Abstand zum Ursprung hat oder diesen beinhaltet. Der Betrag der kürzesten Verbindung  $\mathbf{p}$  des Ursprungs  $O$  zur Oberfläche dieses Simplex entspricht dem Abstand bzw. der Durchdringungstiefe der beiden Polyeder. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.8 veranschaulicht. Siehe

auch Anhang A.2 für die mathematische Herleitung der Durchdringungstiefe. Im Vergleich zum LC-Algorithmus ist der GJK-Algorithmus stabiler und berücksichtigt generell die Durchdringungstiefe. Allerdings erfordert der GJK-Algorithmus mehr Gleitkomma-Operationen (MIRTICH 1998), was sich nachteilig auf die Berechnungsgeschwindigkeit auswirkt. Ebenso wie beim LC-Algorithmus existieren mehrere Implementierungen und Verbesserungen wie z. B. von CHUNG & WANG (1996), CAMERON (1997) oder SUNDARAJ ET AL. (2000). Die bekannteste Implementierung des GJK-Algorithmus ist die Kollisionserkennung SOLID, die die Verbesserung von CAMERON (1997) aufgreift und von VAN DEN BERGEN (1997, 1999, 2001, 2004) mehrfach beschrieben und weiter optimiert wird. Speziell zur iterativen Bestimmung der Durchdringungstiefe  $|\mathbf{p}|$  wird der Expanding-Polytope-Algorithmus (EPA) von VAN DEN BERGEN (2001) eingesetzt. Eine alternative Methode zur Bestimmung von  $|\mathbf{p}|$  wird von KIM ET AL. (2002a) in der Kollisionserkennung DEEP vorgestellt.

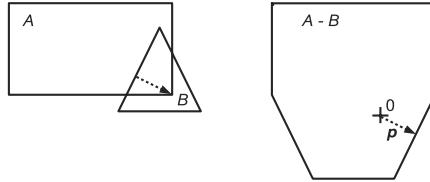


Abbildung 3.8: Berechnung der Durchdringung  $\mathbf{p}$  zweier Polyeder  $A$  und  $B$  mittels der Minkowski-Differenz  $A - B$  (VAN DEN BERGEN 2004, S. 33–38)

### 3.4.3 Physik-basiertes Objektverhalten

Die Umrechnung der Kollisionsinformationen aus der Kollisionserkennung in Kontaktkräfte und die Berechnung des Physik-basierten Verhaltens der virtuellen Objekte finden in der Physiks simulation statt. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der geforderten Echtzeitfähigkeit der IMS nur Ansätze betrachtet werden können, die qualitativ richtige Ergebnisse berechnen, d. h. physikalisch plausibles Objektverhalten darstellen können. Quantitativ richtige Physiks simulationen sind entsprechend dem Stand der Technik an Rechnerhardware und verfügbaren Algorithmen nach wie vor nicht für den Einsatz unter Echtzeitbedingungen geeignet und werden hier nicht weiter berücksichtigt. Zur Berechnung des physikalischen Verhaltens von Körpern in interaktiven Anwendungen unter Echtzeitbedingungen kommen grundsätzlich zwei verschiedene Lösungsansätze in Betracht, die in der Literatur vielfach beschrieben sind. Einen guten Überblick darüber geben z. B. GILLESPIE & COLGATE (1997); es wird zwischen zwei Ansätzen unterschieden:

- Zwangs-basierten Ansätzen und
- Impuls-basierten Ansätzen.

Die Behandlung der kollisionsfreien Bewegung von Objekten im Raum wird dabei von beiden Verfahren auf gleiche Weise behandelt. Unterschiede ergeben sich bei der Berechnung von Kontaktsituationen.

### **Zwangs-basierte Ansätze**

Zwangsbedingungen stellen im Kontext der physikalischen Simulation Randbedingungen im Hinblick auf das mechanische Verhalten von Körpern dar. Diese sind beispielsweise feste Oberflächen, die nicht durchdrungen werden können oder gelenkige Verbindungen. Um derartige Zwangsbedingungen in einer physikalischen Simulation abbilden zu können, haben sich zwei gängige Vorgehensweisen etabliert. Das einfachere anzuwendende sog. Penalty-Verfahren modelliert die auftretenden Kontakte als Feder/Dämpfer-Elemente (MOORE & WILHELMS 1988). Dabei wird angenommen, dass die kollidierenden Körper sich minimal durchdringen können. Als Eingabeparameter für das Feder/Dämpfer-Element dient die Durchdringungstiefe oder wie bei HASEGAWA ET AL. (2003) bzw. HASEGAWA & SATO (2004) das Durchdringungsvolumen. Auf diese Weise lässt sich eine Gegenkraft berechnen, die verhindert, dass ein Körper trotz seiner Masse und der auf ihn wirkenden Gravitation durch eine feste Oberfläche hindurchfallen kann. Besonders vorteilhaft ist an diesem Verfahren die hohe Berechnungsgeschwindigkeit aufgrund der geringen mathematischen Komplexität. Nachteilig wirken sich die erforderlichen großen Federkonstanten aus, die angenommen werden müssen, um die physikalisch nicht plausiblen Durchdringungen der kollidierenden Körper möglichst klein zu halten. Diese führen zu „steifen“ Differentialgleichungen, die numerisch sehr aufwändig zu lösen sind (BARAFF & WITKIN 1997, GILLESPIE & COLGATE 1997). Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens liegt in der indirekten Berechnung der Zwangsbedingungen, da die Abweichungen erst auftreten müssen, bevor diese korrigiert werden können.

Neben der indirekt wirkenden Variante können die an den Kontaktstellen erforderlichen Zwangskräfte, um eine Durchdringung der Körper zu verhindern, auch analytisch berechnet werden. Das Problem der steifen Differentialgleichungen kann so umgangen werden. Der Lösungsansatz wird dabei als ein lineares Komplementaritätsproblem (LCP) mit Ungleichheitsbedingungen formuliert (BARAFF 1994, MIRTICH 1998, SAUER & SCHÖMER 1998, BUCK 1999). Die lineare Beziehung zwischen den Relativbeschleunigungen  $\mathbf{a}$  und

den Kräften  $\mathbf{f}_c$  an den Kontaktpunkten ist (Gleichung 3.6-3.9):

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}\mathbf{f}_c + \mathbf{b}, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{a} \geq 0, \quad (3.7)$$

$$\mathbf{f}_c \geq 0, \quad (3.8)$$

$$\mathbf{f}_c \mathbf{a} = 0. \quad (3.9)$$

Die Kräfte  $\mathbf{f}_c$  garantieren die Einhaltung der Zwangsbedingungen. Durch die Matrix  $\mathbf{A}$  wird die Systemkonfiguration hinsichtlich Masse, Trägheitstensor und Kontaktgeometrie der Körper zusammengefasst, während der Vektor  $\mathbf{b}$  die externen Kräfte und Trägheitskräfte beinhaltet. Die Ungleichheitsbedingungen der Gleichung 3.7 und der Gleichung 3.8 verhindern, dass sich die kontaktierenden Körper weiter aufeinander zu bewegen. Die des Weiteren erforderliche Komplementaritätsbedingung der Gleichung 3.9 bestimmt, dass an jedem Kontaktpunkt entweder eine Kraft oder eine Relativbeschleunigung wirkt. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht in dem relativ hohen Rechenaufwand zur Lösung des LCP. Dies wirkt sich besonders im Falle von Reibbedingungen bei hohen Kontaktzahlen und großen Reibkoeffizienten negativ aus.

### Impuls-basierte Ansätze

Im Gegensatz zu den genannten Zwangs-basierten Verfahren stellen MIRTICH & CANNY (1995) und MIRTICH (1996) einen Lösungsansatz vor, der nicht von kontinuierlichen Zwangskräften zur Verhinderung von Objektüberschneidungen ausgeht, sondern sämtliche Kontakte als eine Abfolge permanenter Kollisionen interpretiert. Dadurch werden bei „ruhenden“ Kontakten laufend Mikroimpulse an die Körper abgegeben, die somit nie in Ruhe sind, sondern sich auf ballistischen Bahnkurven befinden. Die Berechnung der Impulse bezieht die Coulomb'schen Reibkräfte, den Energieverlust und die Elastizität der Körper während der Kollision nach Poisson mit ein. Zwar stellt die Impuls-basierte Kontaktmodellierung aus physikalischer Sicht keine gültige Vorgehensweise dar, jedoch konnten MIRTICH & CANNY (1995) durch den Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und durch vergleichende Experimente die Validität des Ansatzes nachweisen.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der mathematischen Einfachheit und in der höheren Berechnungsgeschwindigkeit im Vergleich zu Zwangs-basierten Simulationsverfahren. So ist aus der Sicht des Simulationsverfahrens keine zusätzliche Unterscheidung hinsichtlich eines ruhenden Kontakts oder eines kollidierenden Kontakts, wie bei Zwangs-basierten Ansätzen erforderlich. Gemäß MIRTICH & CANNY (1995) ist der Ansatz besonders vorteilhaft in Anwendungsfällen einzusetzen, in denen viele Kollisionen und ein schneller

Wechsel von ruhenden und kollidierenden Kontakten auftreten. Eine besondere Eigenart dieses Verfahrens liegt darin, dass es für die Kombination mit dem sehr effizienten LC-Kollisionserkennungsalgorithmus aus Abschnitt 3.4.2 sehr gut geeignet ist. Für die Impulsberechnung ist nämlich das Kriterium eines kritischen Abstands  $\epsilon_c$  ausreichend. Die Berechnung einer Durchdringungstiefe als Maß für die Stärke der Kollision ist nicht erforderlich.

Als nachteilig kann gesehen werden, dass sich die Körper ständig in Bewegung befinden. Dadurch müssen die Impulskräfte im Falle von ruhenden Kontakten so parametrisiert sein, dass die Bewegungen derart klein sind, dass diese dem Benutzer nicht störend auffallen. Zudem reagiert durch die schnelle Abfolge von Kollisionen das Verfahren sehr sensibel auf Fehler oder Ungenauigkeiten aus der Kollisionserkennung. Können diese die tatsächlich auftretenden Kontaktverhältnisse nicht ausreichend genau abbilden, äußert sich dies sofort in einem störenden artifiziellen Verhalten der simulierten Objekte, beschrieben z. B. von STEFFAN (2001, S. 134).

### 3.4.4 Haptisches Rendering

Im Gegensatz zur Berechnung des Physik-basierten Objektverhaltens und der physikalisch plausiblen Kontaktsimulation werden die Kollisionsinformationen beim haptischen Rendering als Kräfte für die Systeminteraktion mit einem menschlichen Benutzer interpretiert. Dem haptischen Rendering kommt aus diesem Grund eine sehr wichtige Schnittstellenfunktion zu. Alle vorher getroffenen Vereinfachungen bzw. potentiellen Instabilitäten des Systems müssen hier derart ausgeglichen und abgefangen werden, um im Endergebnis dem Benutzer einen plausiblen, stabilen Krafteindruck bei der Manipulation virtueller Objekte bei einer IMS vermitteln zu können. Der Bedeutung des haptischen Renderings entsprechend, wurde in den letzten Jahren viel Forschungsarbeit in diesem Bereich geleistet. Einen guten thematischen Überblick geben u. a. BASDOGAN & SRINIVASAN (1997), BURDEA (1999), BURDEA & COIFFET (2003), BASDOGAN & SRINIVASAN (2002) sowie SALISBURY ET AL. (2004). Die wichtigen vom haptischen Rendering umfassten Aspekte sind:

- Stabilität (siehe auch Abschnitt 3.2.3),
- geometrische Kollisionserkennung (siehe auch Abschnitt 3.4.2) und
- Kontaktkraftberechnung.

Der bidirektionale Informations- und Energiefluss zwischen System und Benutzer bei der haptischen Interaktion birgt, wie schon in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, das potentielle

Problem von Instabilitäten in sich. Dies ist einerseits bedingt durch den Menschen als ein aktives Glied im haptischen Regelkreis wie auch andererseits durch eine ungenügende Kraftübertragung auf den Menschen. Die suboptimale Kraftübertragung ist durch den entstehenden Zeitverzug, die mangelnde Steifigkeit, die inhärente Trägheit, Dämpfung und Reibung der mechanischen Kraftübertragungsgeräte zu erklären. So stellen ADAMS ET AL. (1998) fest, dass haptische Eingabegeräte niemals einen unendlich steifen Kontakt wiedergeben können. Schon ZILLES & SALISBURY (1995) beschreiben das Problem, dass Bediener von haptischen Geräten aufgrund der mangelnden Steifigkeit der Mechanik oftmals sehr tief in den zu berührenden virtuellen Körper eintauchen. Eine weitere Quelle der Instabilität ist gegeben, wenn die Berechnung der Kontaktkräfte aus Gründen der Echtzeitanforderungen auf Penalty-Methoden durch virtuelle Federn basiert. Der Grund dafür liegt in der in Abschnitt 3.2.3 erläuterten unausgeglichene Energiebilanz beim Spannen und Entspannen von virtuellen Federelementen, die zu einer Destabilisierung der Kontaktsituation beiträgt (siehe auch Abbildung 3.5). Zur Stabilisierung des haptischen Regelkreises tragen eine hohe Abtastrate von ca. 1 kHz und eine Reduktion der Kontaktsteifigkeit  $k_s$  bei, die jedoch oft zu unerwünschten weichen Kontakten führt. Dieser Effekt wird in den Forschungsarbeiten z. B. von SAVALL ET AL. (2002) sowie JOHNSON & WILLEMSSEN (2003) beschrieben. Um dennoch höhere Kontaktsteifigkeiten zu erreichen, werden bei den meisten Ansätzen zur Kontaktkraftberechnung Dämpfungselemente mit der Dämpfung  $k_d$  einbezogen. Diese berücksichtigen nicht nur die Eindringtiefe  $\mathbf{x}_e$  zum Zeitpunkt  $t$ , sondern auch deren Veränderung  $\Delta\mathbf{x}_e$  über die Dauer  $h$  des aktuellen Simulationszeitschritts, wie aus der Gleichung 3.11 hervorgeht. Dieses zusätzliche Glied wirkt somit stabilisierend. Die Fallunterscheidung gemäß Gleichung 3.11 verhindert, dass beim Lösen des Kontakts unerwünschte Anziehungseffekte durch den Dämpfungsterm entstehen.

$$\mathbf{F}_n = -k_s \cdot \mathbf{x}_e(t_i), \quad (3.10)$$

$$\mathbf{F}_n = -k_s \cdot \mathbf{x}_e(t_i) - k_d \cdot \frac{\Delta\mathbf{x}_e}{h} \text{ mit } \begin{cases} k_d \neq 0 & \text{für } \frac{\Delta\mathbf{x}_e}{h} \geq 0 \\ k_d = 0 & \text{für } \frac{\Delta\mathbf{x}_e}{h} \leq 0, \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\Delta\mathbf{x}_e = \mathbf{x}_e(t_i) - \mathbf{x}_e(t_{i-1}) \quad (3.12)$$

Ein weiteres Verfahren, haptische Regelkreise zu stabilisieren, ist der Einsatz des von COLGATE ET AL. (1995) beschriebenen Virtual Coupling (VC). Dabei wird die virtuelle Repräsentation des Benutzers nicht direkt über die gemessene Position und Orientierung des realen Manipulators gesteuert, sondern sie ist mit ihm über ein multidimensionales Feder-Dämpfer-Element verbunden.



## Interaktionsstrategien für das haptische Rendering

Neben Aspekten der Stabilität der Kontaktkraftberechnung spielt die Geometrie der virtuellen Repräsentation des Benutzers, auch Avatar genannt (SALISBURY ET AL. 2004), eine maßgebliche Rolle, da dadurch die Interaktionsstrategie und damit auch die Anforderungen an die Kollisionserkennung bestimmt werden. Allgemein werden drei Interaktionsstrategien unterschieden: Punkt-basiert, Strahl-basiert und Objekt-Objekt-basiert.

Die einfachste und am schnellsten zu berechnende Interaktionsstrategie ist die Punkt-basierte Interaktion mit einem sogenannten Haptic Interface Point (HIP) (ZILLES & SALISBURY 1995). Dies entspricht der Interaktion mit einer Fingerspitze, einem Stift oder spitzen Werkzeug. Da nur ein Punkt mit den virtuellen Objekten agiert, muss demnach die Kollisionserkennung nur überprüfen, ob sich der HIP in einem Objekt befindet und – falls ja – wie tief. Da die Kollision mit einem Punkt und keinem räumlich ausgedehnten Körper berechnet wird, können nur Kräfte und keine Momente abgebildet werden. BARBAGLI ET AL. (2003) beschreiben ein spezielles Verfahren, mit dem die Punkt-basierte Interaktion dennoch um Reibmomente ergänzt werden kann. Die gängige Methode einer Punkt-basierten Interaktionsstrategie wird als God-Object-Methode bezeichnet (ZILLES & SALISBURY 1995). Dabei dringt der HIP zwar nach wie vor in den kontaktierten Körper ein, es wird aber eine zusätzliche Variable, das sog. God-Object bzw. Proxy-Objekt oder IHIP (Ideal Haptic Interface Point) (BASDOGAN & SRINIVASAN 2002), verwendet. Dieses verbleibt gemäß Abbildung 3.9 immer an der Oberfläche des Körpers. Dadurch werden die Probleme, die bei einer direkten Berechnung der Kraft in Abhängigkeit der Durchdringung auftreten können, vermieden. Diese Methode gleicht damit in den Grundzügen dem VC von COLGATE ET AL. (1995). Das God-Object, welches durch einen Punkt dargestellt wird, ist somit an der Stelle, an der es sich befinden würde, wenn das haptische Eingabegerät und der Kontakt unendlich steif wären. Die Verbindung zwischen God-Object

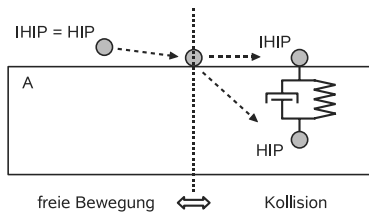


Abbildung 3.9: Kollision eines punktförmigen Avatars mit einem Objekt A und Aufteilung des Avatars in HIP und IHIP nach der Punkt-basierten God-Object-Methode von ZILLES & SALISBURY (1995)

und HIP wird durch eine einfache Feder-Dämpfer-Kombination hergestellt. Die Abbildung nichtlinearen Verhaltens ist ebenfalls möglich. Auch die auftretende Reibung kann durch die Ergänzung einer Gleitbedingung des God-Objects auf der Oberfläche des virtuellen Körpers mit berücksichtigt werden. Probleme des vorgestellten Verfahrens treten u. a. bei Kanten und an konkaven Stellen auf, da ohne spezielle Vorkehrungen das God-Object die Oberfläche durchdringt, bevor der HIP das entsprechende Polygon erreicht.

Bei der Strahl-basierten Interaktion (BASDOGAN ET AL. 1997, HO ET AL. 1997) ist der Benutzeravatar als Geradenstück abgebildet, dessen Orientierung mit berücksichtigt wird. Diese Interaktionsstrategie ist als Vereinfachung vor allem für lange dünne Werkzeuge, wie z. B. Laparoskope, zu sehen. Vergleichbar mit dem HIP und dem IHIP der Punkt-basierten Interaktionsstrategie werden ein sog. Simulated Stylus (SIS) und ein Ideal Stylus (IS) eingeführt, wobei der SIS die tatsächliche Position und Orientierung des Benutzer-Avatars repräsentiert. Tritt eine Kollision des SIS mit einer Linie oder einem Polygon auf, so wird der IS immer an die Oberfläche des kollidierenden Objekts verschoben, so dass nur Punktkontakt herrscht, wie Abbildung 3.10 – Teilbilder a bis c – veranschaulicht. Wie bei der Punkt-basierten God-Object-Methode wird die auftretende Kontaktkraft durch die Größe der Abweichung des SIS vom IS bestimmt. Durch die linienförmige Repräsentation kann der gleichzeitige Kontakt mit mehreren Objekten auftreten, der neben der Kraftberechnung auch die Bestimmung von Momenten ermöglicht (BASDOGAN & SRINIVASAN 2002), wie in Abbildung 3.10 – Teilbild d – dargestellt.

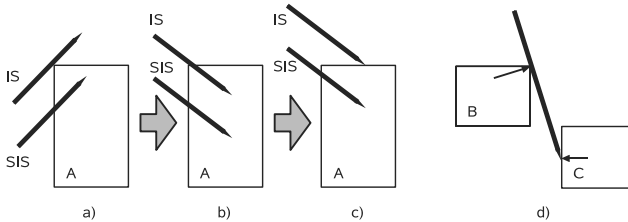


Abbildung 3.10: Strahl-basiertes haptisches Rendering nach BASDOGAN ET AL. (1997) und HO ET AL. (1997); Verschiebung des IS an die Oberfläche der Objekte in den Teilbildern a bis c; im Falle des gleichzeitigen Kontakts mit mehreren Körpern, siehe Teilbild d

Bei der Objekt-Objekt-basierten Interaktion entspricht der Avatar einem räumlichen dreidimensionalen Objekt, wodurch Kontaktkräfte und Momente in sechs Freiheitsgraden berechnet werden können. Aus diesem Grund wird diese Interaktionsstrategie auch als

6-DOF haptisches Rendering bezeichnet. Für die erforderliche realitätsnahe Interaktion für eine IMS bietet diese Interaktionsstrategie die besten Voraussetzungen, allerdings ist ein hoher Berechnungsaufwand erforderlich. Verschiedene Kollisions- und Kraftberechnungsverfahren werden für das 6-DOF haptische Rendering beschrieben. HIROTA ET AL. (1999) sowie HIROTA & HIROSE (2003) stellen ein Verfahren vor, das die Oberfläche des Benutzeravatars durch eine Punktwolke aus HIPs annähert, die gegen eine polygonale virtuelle Umwelt berechnet wird. MCNEELY ET AL. (1999) verfolgen ebenfalls einen Punktwolken-basierten Ansatz, verwenden jedoch als Kollisionsrepräsentation der statischen virtuellen Umgebung (siehe Abbildung 3.11, Teilbild a) ein Voxelmodell. Basierend auf einer rein polygonalen Darstellung der virtuellen Umgebung und des Benutzeravatars, beschreiben GREGORY ET AL. (2000) und KIM ET AL. (2002b) unterschiedliche Ansätze, die auf die Durchdringungstiefe einzelner Polygone zurückgreifen und diese zu einer dreidimensionalen Kraft- und Momenteninformation zusammenfassen. Ein weiteres von HASEGAWA & SATO (2004) vorgestelltes Verfahren beruht bei der Kraftberechnung zweier überschneidender Körper nicht auf der maximalen Durchdringungstiefe einzelner Polygonpaare, sondern betrachtet das gesamte Kollisionsvolumen (Abbildung 3.11, Teilbild b). JOHNSON & WILLEMSSEN (2003) stellen ebenfalls einen 6-DOF-Ansatz für ein haptisches Rendering auf der Grundlage von polygonalen Modellen vor. Dabei wird allerdings aus Performanzgründen auf die Berechnung der Durchdringungstiefe verzichtet. Nur lokale minimale Abstände zwischen den Körpern werden zur Berechnung der Abstoßungskräfte verwendet (Abbildung 3.11, Teilbild c).

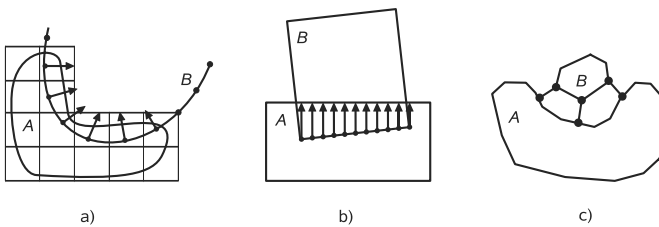


Abbildung 3.11: Unterschiedliche Ansätze zur Objekt-Objekt-Interaktion nach MCNEELY ET AL. (1999) a, HASEGAWA & SATO (2004) b und JOHNSON & WILLEMSSEN (2003) c

### Krafteffekte

Die genannten Strategien zur Kraftberechnung aus der geometrischen Überschneidung der Punkte, Strahlen und Objekte können jeweils zur realistischeren Wiedergabe der Oberflächeneigenschaften um weitere Krafteffekte, basierend auf Reibung, Texturen oder Force-Shading-Effekten, ergänzt werden. So setzt sich nach BASDOGAN & SRINIVASAN (2002) die für den Benutzer berechnete Kontaktkraft  $\mathbf{F}_u$  aus drei Komponenten zusammen (Gleichung 3.13 und Abbildung 3.12):

$$\mathbf{F}_u = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_{tex} \quad (3.13)$$

Die Normalkraftkomponente  $\mathbf{F}_n$  beruht auf dem erweiterten Hook'schen Federmodell und der geometrischen Durchdringung bzw. dem Mindestabstand des Avatars und des virtuellen Objekts. Die Reibkomponente  $\mathbf{F}_r$  wirkt je nach Vereinfachung des Reibmodells (Gleitreibung/Haftreibung) mit einem bestimmten Reibkoeffizienten  $\mu$  entgegen der Bewegungsrichtung. Des Weiteren beinhaltet  $\mathbf{F}_u$  die Texturkomponente  $\mathbf{F}_{tex}$ , die durch die systematische Änderung der Höhe und Richtung des Normalkraftvektors am Kontaktpunkt simuliert wird.

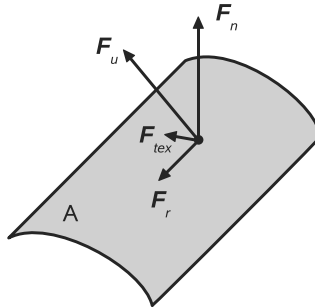


Abbildung 3.12: Kraftkomponenten  $\mathbf{F}_n$ ,  $\mathbf{F}_r$  und  $\mathbf{F}_{tex}$  der an den Benutzer zurückgekoppelten Kraft  $\mathbf{F}_u$  nach BASDOGAN & SRINIVASAN (2002)

Die an der Oberfläche wirkenden Reibkräfte, berechnet durch ein einfaches lineares Reibmodell oder durch aufwändigere Stick-Slip Ansätze (SALISBURY ET AL. 1995, HARWIN & MELDER 2002), erzeugen nur Tangentialkräfte entgegen der Bewegungsrichtung des Benutzeravatars. Dagegen können haptische Texturen die Tangential- und Normalkräfte beeinflussen. Bei der Variation der Tangential- und Normalkräfte zur Nachbildung kleiner Oberflächenunregelmäßigkeiten werden nach BASDOGAN & SRINIVASAN (2002) zwei

Verfahren unterschieden: ein auf 2-D-Bilddaten basierendes Verfahren und ein Verfahren, das auf mathematische Funktionen zurückgreift. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass durch das haptische Rendering künstliche Kraftsprünge, z. B. an Stellen nicht differenzierbarer Oberflächenpunkte polygonaler oder Voxel-basierter Objekte, vermieden oder geglättet werden müssen. Sog. Force-Shading-Verfahren, adaptiert aus der Computergrafik wie z. B. Gouraud-Shading (Lichtintensität) oder Phong-Shading (Oberflächennormalen) (WATT 2002), werden dabei eingesetzt. Die für das haptische Rendering angepassten grafischen Verfahren werden u. a. von ZILLES & SALISBURY (1995), MORGENBESSER & SRINIVASAN (1996) sowie SAVALL ET AL. (2002) beschrieben.



# 4 Konzept

## 4.1 Inhalt des Kapitels

In Kapitel 2 wurde die Ausgangssituation des VR-Einsatzes für die IMS dargestellt und der bestehende Handlungsbedarf aus der Analyse bestehender Ansätze abgeleitet. Aus dieser Perspektive wurden in Kapitel 3 die Grundlagen der technischen Bestandteile und der zu berücksichtigenden technischen Aspekte vorgestellt, die für die Entwicklung eines Systems zur IMS erforderlich sind.

In diesem Kapitel werden aus den bisherigen Erkenntnissen die methodischen und technischen Anforderungen für den Entwurf von  $Ve^2$  definiert. Ein eigenes Konzept zur Integration des Rechnerwerkzeugs in den Montageplanungsprozess wird beschrieben. Zudem werden die einzelnen technischen Konzepte erläutert, mit denen die zentralen Funktionalitäten der Interaktion, der Kollisionserkennung, der Physiksimulation und des haptischen Renderings von  $Ve^2$  realisiert werden.

## 4.2 Anforderungen

### 4.2.1 Methodische Anforderungen

Das Ziel eines VR-Systems als Rechnerwerkzeug zur IMS muss es sein, die Flexibilität, Reaktionsfähigkeit, Transparenz und Effizienz des Montageplanungsprozesses zu verbessern. Die daraus abzuleitenden methodischen Anforderungen für die Systementwicklung von  $Ve^2$  lassen sich dabei wie folgt untergliedern in:

- systematischer Werkzeugeinsatz im Sinne der zielgerichteten Verwendung verfügbarer Softwaretools,
- durchgängige Rechnerunterstützung des gesamten Montageplanungsprozesses,
- minimaler Aufwand für die Modellerstellung und Parameterdefinition und
- kooperatives simultanes Arbeiten in mehrköpfigen Entwicklungs- und Planungsteams.

### Systematischer Werkzeugeinsatz

Ein vorteilhafter Einsatz von VR-Methoden in der Montageplanung bzw. Montagesimulation kann nur erreicht werden, wenn er ein fester Bestandteil einer *strukturierten Vorgehensweise* mit einem *systematischen Werkzeugeinsatz* ist. Nur ein strukturierter organisatorischer Rahmen kann gewährleisten, dass die jeweiligen Aufgaben auch mit dem dafür optimalen Rechnerwerkzeug bearbeitet werden und die Informationsflüsse effizient gestaltet werden können. Um das volle Potenzial der VR-Technologie in der IMS zu nutzen, müssen sich die Anwender über die Leistungsfähigkeit, aber auch über die Grenzen bewusst sein.

### Durchgängige Rechnerunterstützung

Wie aus Abschnitt 2.2 hervorgeht, handelt es sich bei der Montageplanung um einen komplexen mehrstufigen Prozess. Über die verschiedenen Phasen hinweg sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Aufgaben zu bearbeiten, die darüber hinaus mit der teilweise simultanen Produktentwicklung vernetzt sind. Ein optimales Arbeitsergebnis kann demzufolge nur durch eine methodisch phasen- und aufgabenübergreifende *durchgängige Rechnerunterstützung* erreicht werden. Darunter ist die erforderliche datentechnische Integrierbarkeit der verschiedenen Entwicklungs- und Planungswerkzeuge, aber auch eine durchgängige Verwendung der Planungsergebnisse zu verstehen.

### Minimaler Aufwand

Jedes Rechnerwerkzeug erfordert einen gewissen Aufwand hinsichtlich der Datenbeschaffung, der Datenaufbereitung, der Anwendung und der abschließenden Ergebnisbewertung. Jedoch wird, wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, der aktuelle Aufwand für die Durchführung einer Montagesimulation häufig als zu hoch eingeschätzt. Aus diesem Grund wird gerade in der manuellen Montageplanung oftmals auf eine simulative Absicherung verzichtet, wodurch Optimierungspotentiale und die Möglichkeiten für eine frühe Fehlererkennung nicht ausgeschöpft werden. Ein möglichst *geringer Aufwand* ist damit für den erfolgreichen Praxiseinsatz der IMS eine zentrale Anforderung.

### Kooperatives simultanes Arbeiten

Ausgehend von der stetig geforderten Verkürzung der Entwicklungs- und Planungszyklen findet eine fortlaufende Parallelisierung von Vorgehensschritten im Sinne eines Simultaneous oder Concurrent Engineering statt. Eine funktionierende Abstimmung zwischen



den verschiedenen Mitarbeitern und eine gemeinsame Entscheidungsfindung an den interdisziplinären Überschneidungen der Kompetenzbereiche sind demnach grundlegende Voraussetzungen für eine erfolgreiche Produktentwicklung und Produktionsplanung. Daher ist die gezielte Unterstützung *kooperativer Arbeitsweisen* auch für die IMS unbedingt erforderlich.

### 4.2.2 Technische Anforderungen

Die methodischen Anforderungen haben für die konkrete Umsetzung von  $Ve^2$  als ein Physik-basiertes IMS-System mit kraftrückkoppelnden Handinteraktionsgeräten hohe technische Anforderungen zur Folge. Besondere Schwerpunkte liegen auf der Integrationsfähigkeit in vorherrschende Prozesse mit etablierten Rechnerwerkzeugen, auf der Performanz und auf der Qualität der Darstellung und der Interaktion. Die Anforderungen lassen sich dabei in die im Folgenden näher beschriebenen Unterpunkte gliedern:

- Datenformat und Datenaustausch,
- Systemflexibilität,
- Performanz,
- Eingabegeräte,
- Ausgabegeräte,
- Simulation und Analyse sowie
- Systemergonomie und Sicherheitsaspekte.

#### Anforderungen an das Datenformat und den Datenaustausch

Das Datenformat muss sowohl den Echtzeitanforderungen als auch den in der Praxis zur Verfügung stehenden Datenquellen genügen. Um den Echtzeitanforderungen bei der visuellen Darstellung und virtuellen Manipulation entsprechen zu können, müssen die Geometriedaten aus polygonisierten Daten, d.h. Dreiecks- und Vierecksflächen, angenähert abgebildet werden. Die Anforderungen an den Datenimport sind dahingehend auszurichten, die polygonisierten Datenformate der Datenquellen wie z. B. aus 3-D-CAD-Systemen und 3-D-Simulationssystemen möglichst verlustfrei einzulesen. An den Datenexport aus  $Ve^2$  sind keine besonderen Anforderungen zu stellen, da in der VR-Umgebung keine geometrischen Veränderungen an den virtuellen Prototypen vorgenommen werden sollen.

### Anforderungen an die Systemflexibilität

Da der Vorteil einer IMS im Gegensatz zu nicht immersiven 3-D-Simulationen in einer schnell durchführbaren Echtzeitbewertung des Montageszenarios liegt, sind hohe Anforderungen an die Systemflexibilität zu stellen, um diesen Vorteil nicht durch aufwändige Vorbereitungen zu vermindern. Für kurze Rüstzeiten sind eine leichte Konfigurierbarkeit und Anpassbarkeit der Hardwarekomponenten des Systems wie auch des abzubildenden Szenarios erforderlich. In diesem Zusammenhang wird die Trennung von systemspezifischen Konfigurationsdaten und aufgabenrelevanten Daten gefordert, um die Wiederverwendbarkeit vorhandener Konfigurationen und Testszenarien in unterschiedlicher Ausprägung zu verbessern.

### Anforderungen an die Performanz

Die Anforderungen an die Performanz lassen sich in visuelle Performanz, haptische Performanz und simulative Performanz unterteilen.

Die menschliche visuelle Wahrnehmung reagiert, wie von STANNEY ET AL. (1998, S. 334 f.) anhand verschiedener Beispiele beschrieben, sehr sensibel auf Anomalien, insbesondere bei der Darstellung von Bewegungen bzw. bewegten Objekten. Daraus ergibt sich mindestens eine erforderliche Bildrate von 30 Hz für das visuelle Rendering. Unterhalb dieser Frequenz kann das menschliche Gehirn die Bildübergänge nicht mehr fließend ausgleichen, wodurch die Bewegungen ruckartig erscheinen. Die Hardwareanforderung für die visuelle Abbildung orientiert sich am zeitlichen Auflösungsvermögen des menschlichen Auges, das zwischen 20 ms und 30 ms beträgt (CHARWAT 1994, S. 34). Aus diesem Grund sollten keine Visualisierungsmedien mit einer Bildaufbaufrequenz von unter 60 Hz eingesetzt werden, da die dadurch entstehenden Helligkeitsunterschiede sich für das Auge in einem unangenehmen Flackern äußern würden.

Die erforderliche haptische Performanz wird durch die Auflösungsgrenze der einzelnen menschlichen Finger bei der taktilen Wahrnehmung unterschiedlicher Kraftsignale festgelegt. Diese wird auf der Basis von SHIMOGA (1992) mit 320 Hz angenommen (siehe Abschnitt 3.2.2). Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass auch die fühlbare Kontaktsteifigkeit in Verbindung mit der Stabilität des Regelkreises des haptischen Interaktionsgerätes eine große Rolle spielt. So wurde in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, dass für die Darstellung harter Kontakte mit einer Steifigkeit von 6,7 kN/m eine Update-Rate von 100 Hz ausreicht; für die Darstellung härterer Oberflächen mit einer Oberflächensteifigkeit von 70 kN/m ist jedoch eine Update-Rate von 1 kHz erforderlich. Um möglichst harte Kontakte zu gewährleisten, ist damit eine Wiederholrate von ca. 1 kHz anzustreben.

Als ein weiterer wesentlicher Bestandteil des geforderten echtzeitfähigen Systems ist auch

die simulative Performanz zu berücksichtigen. Die Anforderung ist, ein realitätsnahes Kollisions- und Bewegungsverhalten der virtuellen Objekte unter Echtzeitbedingungen zu gewährleisten. Dabei sind das virtuelle Objektverhalten und die Stabilität der Simulation maßgeblich von dem der physikalischen Berechnung zugrundeliegenden Integrationsalgorithmus und der verwendeten Integratorschrittweite abhängig. Aus diesem Grund ist dieser mit besonderer Sorgfalt auszuwählen und auch im Hinblick auf die haptische Performanz abzustimmen.

Die geforderte Performanz der unterschiedlichen Bereiche stellt hohe Anforderungen an die heutige Rechnerhardware. Aus diesem Grund ist eine leistungsfähige Gestaltung der Softwarearchitektur unter optimaler Ausnutzung der Systemressourcen erforderlich. Dies bedeutet die Parallelisierung von Berechnungsprozessen für den effizienten Einsatz von Mehrprozessor-Recheneinheiten und die effiziente Ausschöpfung des zur Verfügung stehenden Arbeitsspeichers.

### **Anforderungen an die Eingabegeräte**

Um eine realitätsnahe Interaktion zu ermöglichen, müssen die Handbewegungen und die Blickrichtung des Anwenders erfasst werden. Die Anforderungen, die an ein Positionserfassungsgerät zu stellen sind, sind eine geringe Verarbeitungszeit bzw. Latenzzeit und damit einhergehend kurze Wiederholraten, um auch schnelle Bewegungen korrekt erfassen zu können. Des Weiteren ist eine genaue robuste Positionserfassung erforderlich, die durch äußerliche Faktoren wie metallische Gegenstände oder durch Verdeckung möglichst gering beeinflusst wird. Zudem ist auf die Benutzerfreundlichkeit und den Tragekomfort der Positionserfassung, gekennzeichnet durch geringe Gewichtskräfte und kabellosen Datenaustausch, zu achten.

### **Anforderungen an die Ausgabegeräte**

Die Anforderungen, die an die Ausgabegeräte gestellt werden, umfassen Kriterien für die visuellen Ausgabegeräte und die haptischen Ausgabegeräte.

Die Anforderungen an das visuelle Ausgabegerät bestehen in einer immersiven, räumlichen Darstellung des virtuellen Szenarios in einem möglichst realitätsgetreuen Maßstab. Damit ist auch eine der visuellen Ausgabe entsprechende intuitive räumliche Interaktion im Maßstab 1:1 gewährleistet. Die Einarbeitungszeit mit dem VR-System sinkt und Anwender, die keine Simulationsexperten sind, finden so einen leichten Einstieg in die IMS. Ergonomische Fragestellung wie z. B. die Erreichbarkeit lassen sich auf diese Weise ebenfalls intuitiv beantworten. Um kooperatives Arbeiten zu unterstützen, sollte das visuelle

Ausgabegerät für mehrere Benutzer gut einsehbar sein und somit eine große Visualisierungsfläche besitzen. HMDs sind somit für diesen Anwendungsfall nicht geeignet.

Die Anforderung im Hinblick auf die haptischen Ausgabegeräte ist die realitätsnahe Unterstützung der menschlichen Hand, um Montagevorgänge schnell und effizient in einer IMS analysieren zu können. Dies erfordert die Rückkopplung von Greif- und Kontaktkräften. Die Unterstützung der Feinmotorik der menschlichen Hand zur Feinmanipulation virtueller Objekte ist ebenfalls erforderlich. Der Arbeitsraum des Ausgabegeräts sollte dem realen Arbeitsraum entsprechen. Deswegen sollte je nach Anwendungsfall das haptische Eingabegerät tragbar gestaltet sein, wodurch allerdings keine festen Begrenzungen wie Wände oder feste Tischunterlagen haptisch abgebildet werden können. Diese Randbedingung würde beim Einsatz von bodenverbundenen haptischen Handinteraktionsgeräten nicht bestehen. Der verfügbare Arbeitsraum ist jedoch bei den bekannten Geräten für die Abbildung der Modelle in einem Maßstab von 1:1 bzw. für die realitätsnahe Durchführung der Simulationsaufgabe nicht ausreichend, was eine größere Einschränkung für die IMS bedeuten würde.

### **Anforderungen an die Simulation und Analyse**

Die Hauptanforderung an die Simulation besteht in der Darstellung eines realitätsnahen Physik-basierten Objektverhaltens mit Berücksichtigung der Gravitation, der Massenverteilung und der Kontakteigenschaften der virtuellen Objekte. Dies ist für das dynamische Objektverhalten der virtuellen Bauteile und virtuellen Werkzeuge, einzeln und im Zusammenwirken miteinander, in der Interaktion mit der statischen virtuellen Arbeitsumgebung, aber auch bei der Manipulation der dynamischen Objekte durch den Benutzer erforderlich. Die direkte Ausführung der Montageaufgabe soll dadurch möglich sein. Um den realitätsnahen Eindruck nicht zu beeinträchtigen, sind keine zusätzlichen artifiziellen Positionierungs- oder Verbindungshilfsmittel wie z. B. ein virtueller Magnetismus oder Snapping-Mechanismen vorzusehen. Für die weitere Verwertung und Analyse der Ergebnisse aus der IMS ist eine Möglichkeit zur Aufzeichnung des durchgeführten simulierten Montageablaufs notwendig. Erforderlich ist dabei nicht nur die Dokumentation des Bewegungs- und Kraftverlaufs, sondern auch die Speicherung der Bilddaten.

### **Anforderungen an die Systemergonomie und Sicherheitsaspekte**

Bei der technischen Realisierung des VR-Systems ist neben einer einfachen und intuitiven Bedienung auch auf die maximale gesundheitliche Verträglichkeit zu achten, damit das System auch für längere Arbeitseinheiten geeignet ist. Darunter fallen eine geringe visuelle Belastung, was durch hochauflösende, lichtstarke und kontrastreiche Ausgabemedien und

eine möglichst geringe Gewichtsbelastung durch tragbare Hardware (HMD, Marker zur Positionserfassung, haptische Interaktionsgeräte) erreicht wird. Zudem ist auf eine geringe akustische Belastung durch Peripheriegeräte zu achten, wie sie z. B. durch Lüfter oder durch falsch eingestellte akustische Ausgabegeräte entstehen kann. Durch den Verzicht auf magnetische Trackingtechnologien sollte eine möglichst hohe elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) angestrebt werden. Außerdem sind Beeinträchtigungen der Sicherheit, wie sie durch frei liegende Kabel gegeben sind, in der realen Simulationsumgebung zu vermeiden, um Stolperfallen während einer abgedunkelten VR-Sitzung auszuschließen. Darüber hinaus sind Sicherheitsschalter zum sofortigen Abschalten der fest mit dem Anwender verbundenen kraftrückkoppelnden Interaktionsgeräte vorzusehen.

Ein ebenfalls nicht zu vernachlässigendes Phänomen bei immersiven Systemen ist die Simulatorkrankheit (Cybersickness), bei der anhaltender Schwindel und Übelkeit auftreten. Dieser Effekt wurde vielfach in der Fachliteratur diskutiert (STANNEY ET AL. 1998, POTTEL 1998). Als die Hauptursache der Simulatorkrankheit wird der sensorische Konflikt zwischen dem visuellen und dem vestibulären Kanal gesehen. Dieser tritt z. B. bei der Navigation durch eine virtuelle Umgebung auf, da der Benutzer visuell eine Bewegung wahrnimmt, diese jedoch durch die fehlenden realen Beschleunigungskräfte sensorisch nicht bestätigt wird. Wichtige Anforderungen zur Vermeidung der Simulatorkrankheit sind eine hochwertige visuelle Darstellung in Echtzeit, die Vermeidung von Latenzen und eine gute Kontrolle des Benutzers über die in der virtuellen Welt ausgeführten Bewegungen.

## 4.3 Prozessintegration

### 4.3.1 Makroebene

Wie in Abschnitt 4.2.1 gefordert, muss der Einsatz einer Umgebung zur IMS methodisch in den Planungsprozess eingebunden sein. Abbildung 4.1 zeigt die durch den VR-Einsatz erzielbaren Ergebnisse in Verbindung mit den verschiedenen Phasen der Montageplanung.

#### **Phase 1: Vorbereitung**

Das System zur IMS als Planungshilfsmittel kann eingesetzt werden, sobald 3-D-Daten des Produkts vorliegen. Zu dieser sehr frühen Phase kann das System zwar noch nicht im eigentlichen Sinne einer IMS verwendet werden, jedoch fördern die immersive Darstellung und die intuitive räumliche Interaktion das Verständnis für die Aufgabenstellung. So können kritische Aspekte frühzeitig über interdisziplinäre Kompetenzbereiche hinweg gemeinsam identifiziert und diskutiert werden.

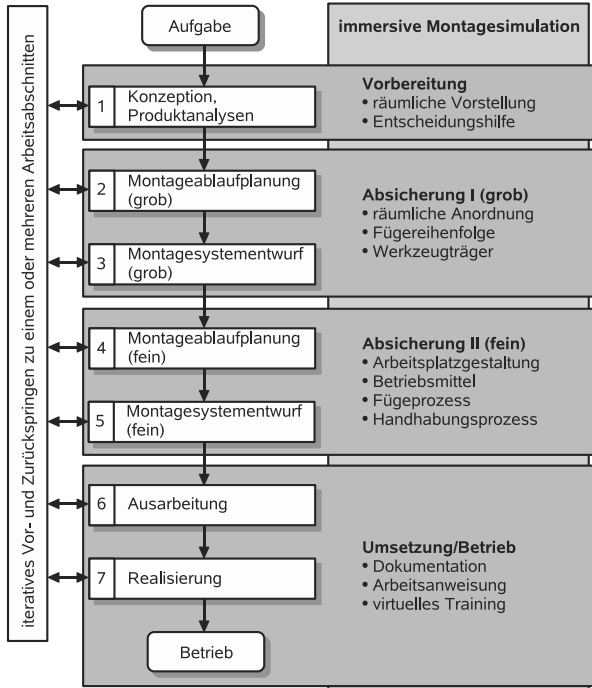


Abbildung 4.1: Einsatzbereiche der IMS in der Montageplanung

### Phasen 2 bis 3: Absicherung I (grob)

In den Phasen der Montageablaufplanung (grob) und des Montagesystementwurfs (grob) ist der Einsatz des Systems zur Überprüfung räumlich globaler Fragestellungen wie auch lokaler Fragestellungen möglich. Liegen dem Planer die entsprechenden Daten der Produktionsumgebung vor, so kann das System zur räumlichen Exploration des Gesamtlayouts und der Anordnung der verschiedenen Montagestationen genutzt werden. Eine immersive Objektmanipulation ist für diesen Anwendungsfall noch nicht erforderlich, da der Hauptanteil der Interaktion in Navigationsaufgaben besteht. Der Schwerpunkt des Einsatzes der IMS liegt in der Analyse und in der Überprüfung räumlich begrenzter Fragestellungen. So dient die IMS zur Absicherung der generellen Machbarkeit, zur Verifizierung der geometrischen Plausibilität des Produkts und der vorgesehenen Werkstückträger sowie zur interaktiven Überprüfung der Fügeihenfolge.

### **Phasen 4 bis 5: Absicherung II (fein)**

Der Haupteinsatzbereich der IMS ist in den Planungsphasen vier und fünf zu sehen, da zu diesem Planungszeitpunkt die geometrischen Produktdaten schon einen sehr hohen Reifegrad erreicht haben und die räumliche Produktionsumgebung ebenfalls zu einem großen Teil festgelegt ist. In diesen Phasen dient die Simulation zur Analyse und Überprüfung sowohl der Arbeitsplatzgestaltung wie auch der räumlich optimierten Anordnung der Betriebsmittel aus ergonomischer und funktionaler Sicht. Des Weiteren werden in der IMS Fügeprozesse unter Berücksichtigung der geforderten Fügereihenfolge und der Zugänglichkeit abgesichert; zudem findet in diesen Phasen die Analyse und Optimierung der manuellen Handhabungsprozesse wie z. B. hinsichtlich der Greifwege und Greifzeiten statt.

### **Phasen 6 bis 7: Umsetzung und Betrieb**

Die späten Planungs- und Entwicklungsphasen sechs und sieben haben die konkrete Umsetzung und die Inbetriebnahme des Montagesystems zum Ziel. Der Einsatzbereich der IMS ist dabei vorrangig in der aufwandsarmen Erstellung von Arbeitsanweisungen zu sehen, die Füge- und Handhabungsprozesse bildlich darstellen. Vorbereitend oder begleitend zur Inbetriebnahme bzw. zum Betrieb dient die IMS als Trainingsumgebung für Werker, um vorab am virtuellen Prototypen schwierige Montage- und Demontageschritte zu testen und die notwendigen Handhabungs- und Fügeprozesse einzuüben.

## **4.3.2 Mikroebene**

Die Prozessintegration muss nicht nur auf einer übergeordneten Ebene stattfinden. Wie schon in Abbildung 2.9 (S. 24) veranschaulicht, ist für den erfolgreichen praktischen Einsatz der IMS vor allem eine gute Feinabstimmung des Simulationsprozesses und der Simulationsdurchführung erforderlich.

### **Simulationsprozess**

Der Simulationsprozess beim Einsatz der IMS besteht nicht nur aus der eigentlichen Simulationsdurchführung, sondern es sind ergänzend dazu eine vorbereitende Phase und eine Nachbereitungsphase erforderlich. Abbildung 4.2 stellt die Phasen mit den jeweiligen Eingangsinformationen, den auszuführenden Arbeiten und den Arbeitsergebnissen dar.

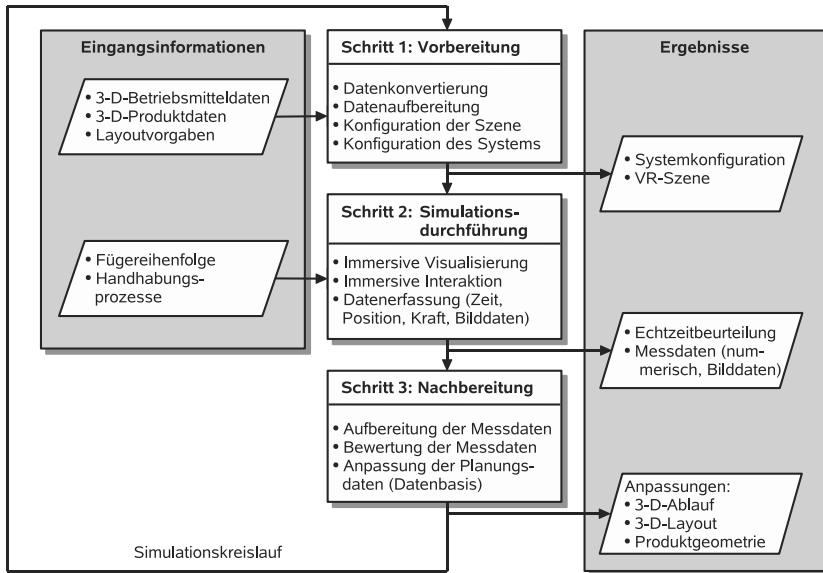


Abbildung 4.2: Drei Schritte des Simulationsprozesses der IMS mit den jeweiligen Eingangsinformationen und Arbeitsergebnissen

In der Phase 1 – Vorbereitung – dienen als Eingangsinformation die 3-D-Betriebsmitteldaten bzw. Platzhalter, die der späteren räumlichen Ausgestaltung entsprechen. Weitere Eingangsinformationen sind sowohl die 3-D-Produktdaten des virtuellen Prototyps als auch Layoutvorgaben, die z. B. aus 2-D-Datensätzen entnommen und in eine räumliche Struktur übertragen werden. Darauf folgen die Konvertierung der Datensätze in echtzeitfähige polygonisierte Formate und die entsprechenden Ergänzungen der rein geometrischen Datensätze um physikalische Informationen wie Masse, Trägheitstensor und Oberflächenparameter. In einem weiteren Schritt wird mit den aufbereiteten Datensätzen die komplette Szene zusammengestellt. Je nach geforderter Darstellungsart und eingesetzten Interaktionsgeräten wird das System entsprechend konfiguriert oder mit einem vorab definierten Standardprofil verwendet.

In der Phase 2 – Simulationsdurchführung – dienen als Eingangsinformation die in Phase 1 erstellten Konfigurationsdateien und dazu evtl. ergänzend vorhandene Prozessinformationen zur Fügereihenfolge und zu den erforderlichen Handhabungsprozessen. Während der Simulation überprüft und verifiziert der Simulationsanwender in der immersiven Um-



gebung die Eingangsdaten. Er zieht intuitiv in Echtzeit Rückschlüsse hinsichtlich evtl. notwendiger Veränderungen im 3-D-Layout, des 3-D-Ablaufs oder der 3-D-Produktgeometrie. Während der Simulation werden kontinuierlich oder zu bestimmten Zeitpunkten Messdaten bezüglich der Szene und des Anwenders erfasst und gespeichert.

Die Phase 3 – Nachbereitung – dient zum systematischen Nachbereiten der Simulationsergebnisse. Sie ist durch die Aufbereitung und Analyse der numerischen und bildlich erfassten Messdaten gekennzeichnet. Nach der Bewertung der Messergebnisse dienen diese zur Anpassung und weiteren Detaillierung der dem Planungs- und Entwicklungsprozess zugrundeliegenden Datenbasis.

### **Simulationsdurchführung**

Die Simulationsdurchführung ist die zentrale Phase des Simulationsprozesses, in der die eigentliche Analyse- und Planungsarbeit vollzogen wird. Das Unterscheidungsmerkmal interaktiver IMS gegenüber Desktop-basierten 3-D-Simulationssystemen mit Mausinteraktion liegt in der direkten realitätsnahen Manipulation der virtuellen Objekte durch den Anwender und ist nicht durch Point-and-Click-Operationen charakterisiert. Um die Vorteile der immersiven Interaktion für die Optimierung der PMV und SMV nutzen zu können, ist die Abbildung der Grundbewegungen Greifen, Bringen, Fügen, Loslassen und Hinlangen nach MTM (vgl. Abschnitt 2.2) erforderlich. Diese sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Dem Simulationsanwender muss es möglich sein, die virtuellen Objekte ohne vorhergehenden Selektionsprozess realitätsnah zu greifen und aufzunehmen. Den vorab definierten Oberflächenparametern der virtuellen Hand und der virtuellen Objekte entsprechend, soll das Objekt in der Hand fixiert werden können. Im Anschluss daran muss das gegriffene Objekt durch die Armbewegung des Simulationsanwenders zu seinem Bestimmungsort transportiert und währenddessen grob vororientiert werden. Darauf soll unter Zuhilfenahme der Feinmotorik der menschlichen Finger eine Feinpositionierung und Feinorientierung des virtuellen Objekts und im Anschluss daran der eigentliche Fügevorgang erfolgen können. Abschließend muss es möglich sein, das Objekt durch das Öffnen der virtuellen Hand gemäß der entsprechenden simulierten Reibkräfte wieder freizugeben. Sind zur Durchführung der Fügeaufgabe Betriebsmittel notwendig, so sollen diese entsprechend manipuliert werden können.

Wichtig ist bei einer derartigen Simulationsdurchführung der Verzicht auf alle artifiziellen Hilfsmittel in der virtuellen Montageumgebung, wie virtueller Magnetismus oder virtuelle Führungen. Diese würden einerseits die Vorbereitungsphase verlängern und andererseits das Simulationsergebnis schon zum Teil vorwegnehmen, wodurch die Gefahr einer Verfälschung der Simulationsergebnisse bestehen würde.

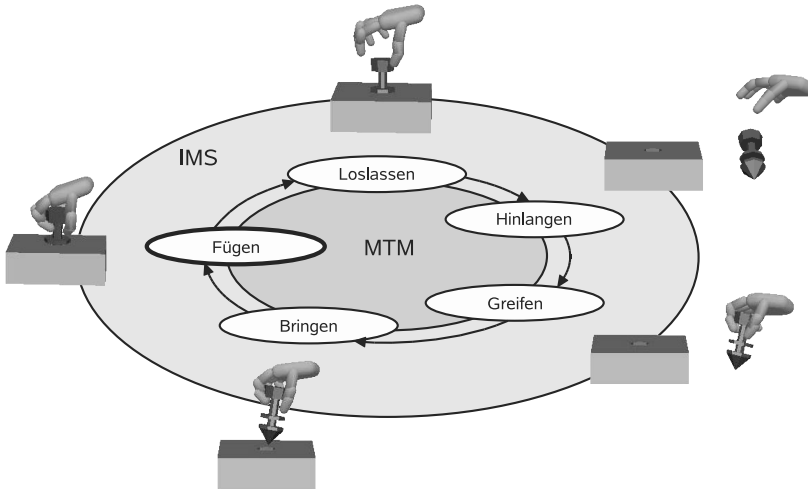


Abbildung 4.3: Simulationsdurchführung der Grundbewegungen nach MTM in einer IMS

## 4.4 Technische Konzeption

### 4.4.1 Allgemeines

Die technische Konzeption beschreibt die für die konkrete Umsetzung von  $Ve^2$  ausgewählten Teilkonzepte. Diese basieren auf den in Kapitel 3 vorgestellten Lösungsansätzen und bekannten Umsetzungen und den in den Abschnitten 4.2 und 4.3 definierten Anforderungen und erläuterten Randbedingungen.

### 4.4.2 Interaktionskonzept

Das zentrale Konzept, an dem sich alle anderen technischen Teilkonzepte orientieren, ist das allgemeine Interaktionskonzept. Dessen wichtigste Aufgabe ist, dass sich der Bediener generell bei der Durchführung einer IMS auf die immersive Montage und die Lösung der damit verbundenen Analyseaufgabe voll konzentrieren kann. Die zusätzlich notwendige kognitive Beanspruchung durch die eingesetzten Hilfsmittel hat möglichst gering zu sein. Dieser Grundansatz wird durch eine realitätsnahe visuelle und haptische Darstellung der virtuellen Objekte und Montageszenarien sehr gut unterstützt. Im Hinblick auf die in Abschnitt 4.2 genannten Anforderungen ist als Benutzerinteraktion von den genann-

ten Basisinteraktionen Navigation, Objekt-Selektion, Objekt-Veränderung und Objekt-Bewegung vor allem die Objekt-Bewegung von großer Bedeutung. Der Navigation fällt eine untergeordnete Bedeutung zu, da während einer IMS nur ein kleiner räumlicher Bereich wie z. B. ein virtueller Handarbeitsplatz abgedeckt werden muss. Das technische Konzept sieht dabei in  $Ve^2$  die Navigation über die Positionserfassung des Kopfes des Bedieners und eines 3-D-Zeigestabs vor. Die Objekt-Selektion, die einen ungewollten artifiziellen Auswahlvorgang darstellt, ist in  $Ve^2$  ebenso wie die interaktive Veränderung von Objekten nicht berücksichtigt. Das Konzept der Objekt-Bewegung durch den Benutzer ist in  $Ve^2$  eine realitätsnahe und direkte Interaktion, wodurch Physik-basierte Greifverfahren eingesetzt werden können. Diese bieten zudem den Vorteil eines geringen Aufwandes bei der Simulationsvorbereitung, da keine artifiziellen Verhaltensregeln der Objekte definiert werden müssen.

#### 4.4.3 Interaktionsgerät

Abgeleitet von dem Interaktionskonzept, das eine direkte Handinteraktion und ein Physik-basiertes Greifverfahren vorsieht, bieten sich im Hinblick auf die Auswahl des Interaktionsgeräts, wie in den Abschnitten 3.3.2 bis 3.3.4 beschrieben, theoretisch vielseitige technische Möglichkeiten an Sensorhandschuhen und haptischen Handinteraktionsgeräten an. Diese Auswahl schränkt sich jedoch unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Abschnitte 3.2.2 und 3.2.5 auf haptische Handinteraktionsgeräte ein, da Sensorhandschuhe aufgrund der fehlenden gerichteten Kraftrückkopplung für die Umsetzung realitätsnaher Physik-basierter Greifalgorithmen als nicht geeignet erscheinen. Wird des Weiteren die konkrete Umsetzung der IMS auch im industriellen Umfeld mit berücksichtigt, so kommen als haptische Handinteraktionsgeräte ausschließlich kommerziell verfügbare Geräte in Betracht. Unter diesen Randbedingungen stellt für die entwickelte IMS-Umgebung  $Ve^2$  der CyberGrasp<sup>TM</sup> das zu bevorzugende haptische Handinteraktionsgerät dar. Die Vorteile des CyberGrasp<sup>TM</sup> liegen zudem darin, dass er im Vergleich mit allen anderen Systemen durch den CyberGlove<sup>®</sup> mit 22 Sensoren die Handstellungen und Handbewegungen am detailliertesten erfasst. Die leichte Erweiterbarkeit des tragbaren Systems um den CyberForce<sup>TM</sup> zu einem bodengebundenen System ist ein weiterer Vorteil. Mit der ausgereiften kommerziellen Treibersoftware VirtualHand<sup>®</sup> SDK ist darüber hinaus die Integration des Interaktionsgeräts in  $Ve^2$  erleichtert. Im Vergleich zu den anderen beschriebenen haptischen Handinteraktionsgeräten muss die geringe Anzahl von nur fünf Aktoren als nachteilig angesehen werden, da diese keine gezielte Ansteuerung einzelner Fingergelenke erlaubt. Da dazu allerdings in der Literatur keine Informationen hinsichtlich merklicher negativer Auswirkungen auf die Benutzerinteraktion zu finden sind, wird dieses Bewertungskriterium als untergeordnet betrachtet.

Bei der Integration dieses Gerätekonzepts in  $Ve^2$  ist zu bemerken, dass tragbare Systeme aufgrund der fehlenden Erdung des Kraftflusses prinzipbedingt nur die Greifkräfte bei der Interaktion mit virtuellen Objekten zurückkoppeln können. Bodengebundene Systeme hingegen ermöglichen die Rückkopplung von Gewichtskräften und festen Barrieren in der virtuellen Umgebung, wie z. B. die haptische Repräsentation einer festen Montageunterlage. Der Arbeitsraum ist jedoch den Dimensionen des Interaktionsgeräts entsprechend bisweilen stark eingeschränkt. Im Falle der Analyse von manuellen Montagevorgängen ist allerdings die Darstellung des vollständigen Arbeitsraums im Maßstab 1:1 erforderlich, weshalb der Einsatz bodengebundener Geräte für diesen Anwendungsfall nicht in Betracht gezogen wird.

### 4.4.4 Kollisionserkennung

Im Hinblick auf die Auswahl des Konzepts der Kollisionserkennung ist eine gegenüberstellende Bewertung der in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Verfahren sehr schwierig. Die Performanz der verschiedenen Ansätze ist stark vom jeweiligen Anwendungsfall, der Implementierung und der maschinenspezifischen Übersetzung des Quellcodes der Kollisionserkennungspakete abhängig (LIN & GOTTSCHALK 1998, REGGIANI ET AL. 2002).

Als grundlegender Kollisionsalgorithmus für Polygon-basierte Objekte wurde jedoch der GJK-Algorithmus dem LC-Algorithmus vorgezogen. Die mittels des GJK-Algorithmus direkt berechenbaren Durchdringungstiefen sind für die Kombination der Kollisionserkennung mit einer Physiksimulation sehr vorteilhaft einzusetzen. Dies bestätigen auch HASEGAWA & SATO (2004), die erfolgreich den GJK-Algorithmus als Grundlage einer Physik-basierten haptischen Interaktion verwenden. Aus den verfügbaren Kollisionsbibliotheken, die den GJK-Algorithmus implementieren, wurde für  $Ve^2$  die Polygon-basierte Bibliothek SOLID u. a. wegen der positiven Bewertungen durch REGGIANI ET AL. (2002) und LUCIANO ET AL. (2004) ausgewählt. So testeten LUCIANO ET AL. (2004) SOLID und kamen zu dem Schluss, dass sich dieser Kollisionserkennungsansatz sehr gut als Grundlage für die Kontaktkraftberechnung für kraftrückkoppelnde Eingabegeräte verwenden lasse. Die zusammengefassten Gründe für die Verwendung von SOLID in  $Ve^2$  sind:

- die Flexibilität für eine große Klasse von verschiedenen Objekten,
- die Verwendung von AABB als Hüllkörperstrategie, was in einem geringen Speicherbedarf resultiert und eine einfache potentielle Erweiterung der Kollisionsrechnung auf deformierbare Körper erlaubt,
- eine robuste Implementierung,

- ein gut strukturiertes Daten-Management und
- die direkte Berechnung der Durchdringungstiefe und der Oberflächennormalen an den Durchdringungs- bzw. Kontaktstellen der kollidierenden Körper.

#### 4.4.5 Physiksimulation

Als Konzept für die Physiksimulation (vgl. Abschnitt 3.4.3) in  $Ve^2$  wurde ein Zwangs-basiertes Verfahren mit der analytischen Berechnung der Zwangsbedingungen vorgesehen. Den Vorteilen eines robusten und effizient zu berechnenden Kontaktmodells bei Impuls-basierten Verfahren steht der prinzipbedingte Nachteil, keine ruhenden Kontakte abbilden zu können, gegenüber. Da bei der Durchführung einer IMS mit haptischen Interaktionsgeräten eine Vielzahl ruhender Kontakte auftritt und die fälschliche Wahrnehmung der Mikroimpulse für den Benutzer unerwünscht ist, werden Impuls-basierte Lösungsansätze für diesen Anwendungsfall als weniger geeignet eingestuft. Zudem eignen sich Impuls-basierte Verfahren vorrangig für die Berechnung unilateraler Zwangsbedingungen. Gelenkige Mechanismen mit bilateralen Zwangsbedingungen, deren Integration in  $Ve^2$  in Zukunft angedacht ist, wie z. B. Roboter, können dabei besser von Zwangs-basierten Verfahren abgebildet werden. Das für  $Ve^2$  gewählte Verfahren wurde durch die frei erhältliche Softwarebibliothek Open Dynamics Engine (SMITH 2004a) implementiert. Weitere Entscheidungskriterien für die Implementierung mit der Open Dynamics Engine (ODE) sind:

- die ausreichende Performanz,
- die definierten Zykluszeiten durch eine feste Integratorschrittweite,
- die gute Integrationsmöglichkeit der für  $Ve^2$  gewählten Kollisionserkennung SOLID in ODE,
- eine übersichtliche Programmierschnittstelle und
- ein ausreichender Funktionsumfang zur physikalischen Abbildung einer IMS.

Die Interpretation der Kollisionsergebnisse und die Berechnung des physikalischen Verhaltens bzw. der Zwangsbedingungen werden in ODE mit einem Geschwindigkeits-basierten Zeitschrittverfahren berechnet, das in TRINKLE ET AL. (1997), STEWART (1998) sowie ANITESCU ET AL. (1999) näher beschrieben wird. Die Integration erfolgt in ODE durch einen Euler-Integrator erster Ordnung. Die Physiksimulation in  $Ve^2$  wird dabei in folgenden Schritten durchgeführt:

Zur Kontaktdefinition für die Simulation des physikalischen Objektverhaltens sind die Durchdringungstiefe, der Ort des Kontaktpunkts und die Oberflächennormale am Kontaktpunkt erforderlich. Im Falle eines Punktkontakts ist die Durchdringungstiefe null und es existiert ein eindeutiger Kontaktpunkt, an dessen Stelle die Oberflächennormale berechnet werden kann. Tritt jedoch eine Überschneidung auf, kann in diesem Zeitschritt kein eindeutiger Kontaktpunkt ermittelt werden. Dies verdeutlicht Abbildung 4.4. In diesem Fall wird in  $Ve^2$  die Durchdringungstiefe durch den Betrag des Durchdringungsvektors  $\mathbf{p}_{AB}$  bestimmt. Die Oberflächennormale  $\mathbf{n}_K$  wird durch den normierten Vektor  $\mathbf{p}_{AB}$  dargestellt. Diese Annahme ist zulässig, da es sich bei dem Durchdringungsvektor um die kürzeste Distanz handelt, um die die Körper verschoben werden müssen, damit ein reiner Kontakt hergestellt wird. Aus diesem Grund ist der Durchdringungsvektor immer orthogonal zur Oberfläche des Körpers, falls die Oberfläche an dem Kontaktpunkt differenzierbar (d. h. stetig) ist. Da es sich bei den Durchdringungen im Verhältnis zur räumlichen Ausdehnung der virtuellen Objekte um sehr kleine Werte handelt, kann der Kontaktpunkt  $p_K$  durch die Position des Behelpspunktes  $p_{KA}$  angenähert werden.

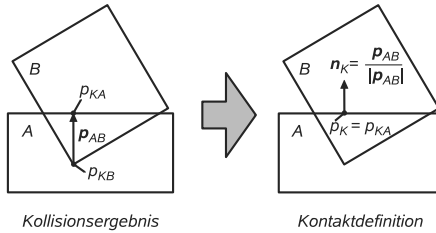


Abbildung 4.4: Approximation des Kontaktpunktes  $p_K$  und des normierten Vektors der Oberflächennormalen  $\mathbf{n}_K$  in  $Ve^2$  durch den Vektor der Durchdringungstiefe  $\mathbf{p}_{AB}$  mit den Punkten  $p_{KA}$  und  $p_{KB}$

Des Weiteren sind für die Kontaktdefinition die ODE-spezifischen Parameter ERP (Error Reduction Parameter) und CFM (Constraint Force Mixing) erforderlich. Der Parameter ERP steht dabei für den Umfang, in welchem Simulationsfehler hinsichtlich der Kontakte im nächsten Simulationsschritt verringert werden sollen. Der Parameter CFM steht für das Maß, in dem die definierten Zwangsbedingungen verletzt werden dürfen. Im Zusammenspiel wirken diese beiden Parameter wie eine Oberflächensteifigkeit und eine Oberflächendämpfung an der Kontaktstelle. Die dort wirkende Reibkraft ist von dem ebenfalls zu definierenden Reibkoeffizienten  $\mu$  abhängig und wird durch das Coulomb'sche Reibmodell,

wie in Gleichung 4.1 ersichtlich, abgebildet:

$$|\mathbf{F}_T| \leq \mu |\mathbf{F}_N|. \quad (4.1)$$

Dabei sind  $\mathbf{F}_T$  und  $\mathbf{F}_N$  die an der Kontaktstelle wirkende Tangential- und Normalkraft. Aus Gründen der Berechnungsgeschwindigkeit ist das Reibmodell jedoch gemäß Gleichung 4.2 vereinfacht:

$$\mathbf{F}_m = \mu |\mathbf{F}_N|, \quad (4.2)$$

wobei  $\mathbf{F}_m$  die maximale Kraft darstellt, ab der an der Kontaktstelle vom haftenden in den gleitenden Zustand übergewechselt wird. In einer weiteren vereinfachenden Annahme wird die Normalkraft  $\mathbf{F}_N$  vor der Berechnung von  $\mathbf{F}_m$  an der Kontaktstelle bestimmt. Zur Berechnung von  $\mathbf{F}_N$  wird von einem reibungslosen Kontakt ausgegangen.

Das Gleichungssystem der Zwangsbedingungen

$$\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\lambda = \mathbf{c} \quad (4.3)$$

$$\left(\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T + \frac{\mathbf{CFM}}{h}\right)\lambda = \frac{\mathbf{c}}{h} \quad (4.4)$$

wird mittels eines Dantzig-LCP-Solvers gelöst, wie es von BARAFF (1994) und BARAFF (1996) detailliert beschrieben wird. Die Gleichung 4.4 ist dabei die ODE spezifische Modifikation (SMITH 2004b) von Gleichung 4.3. Dabei ist  $\mathbf{J}$  die Jacobimatrix der Zwangsbedingungen,  $\mathbf{M}$  ist die Massenmatrix des Systems und  $\lambda$  steht für die Lagrange-Multiplikatoren, nach denen das Gleichungssystem aufgelöst werden muss. Die Dauer der Zeitschritte der Simulation ist  $h$  und  $\mathbf{c}$  der Vektor der äußeren Kräfte, die auf den Körper wirken. Die Lösung von Gleichung 4.4 nach  $\lambda$  führt zu den Zwangskräften  $\mathbf{f}_c$ , die sich nach Gleichung 4.5 berechnen lassen:

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{J}^T\lambda. \quad (4.5)$$

Nach Berechnung der Zwangskräfte werden diese mit den externen Kräften und Momenten zur Summe der Kräfte  $\mathbf{F}$  und zur Summe der Momente  $\mathbf{T}$  zusammengefasst und mit der Dauer  $h$  des verstrichenen Zeitschritts multipliziert. Daraus ergibt sich die Änderung des Impulses  $\Delta\mathbf{P}$  (Gleichungen 4.6) und des Drehimpulses  $\Delta\mathbf{L}$  (Gleichungen 4.7):

$$\mathbf{F}h = \Delta\mathbf{P} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{T}h = \Delta\mathbf{L}. \quad (4.7)$$

Mittels der Änderung des Impulses und des Drehimpulses können daraufhin die Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten  $\mathbf{v}_t$  und  $\boldsymbol{\omega}_t$  des aktuellen Zeitschritts  $t$  für jeden

Körper berechnet werden. Die Masse des Körpers wird mit  $m$  bezeichnet und  $\mathbf{I}^{-1}$  steht für den inversen Trägheitstensor. Die Gleichungen 4.8 und 4.9 verdeutlichen diesen Zusammenhang:

$$\mathbf{v}_t = \mathbf{v}_{t-1} + \frac{\Delta \mathbf{P}}{m} \quad (4.8)$$

$$\boldsymbol{\omega}_t = \boldsymbol{\omega}_{t-1} + \mathbf{I}^{-1} \Delta \mathbf{L}. \quad (4.9)$$

Im letzten Schritt der Starrkörpersimulation werden die Position  $\mathbf{x}_t$  und die Orientierung  $\mathbf{q}_t$  der Körper des aktuellen Zeitschritts  $t$ , basierend auf den Positionen und Orientierungen des vorangegangenen Zeitschritts  $t - 1$ , nach den Gleichungen 4.10 bis 4.12 berechnet:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_{t-1} + h \mathbf{v}_t \quad (4.10)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_t = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_t \mathbf{q}_{t-1} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{q}_t = \mathbf{q}_{t-1} + h \dot{\mathbf{q}}_t. \quad (4.12)$$

#### 4.4.6 Haptisches Rendering

Das in Ve<sup>2</sup> gewählte Konzept für das haptische Rendering (siehe Abschnitt 3.4.4) wird durch zwei Randbedingungen maßgeblich bestimmt. Erstens ist es auf die Möglichkeiten und Einschränkungen des CyberGrasp<sup>TM</sup> als eingesetztes haptisches Interaktionsgerät abgestimmt, das nur Kräfte in Richtung des Handrückens über die fünf Fingerspitzen an den Benutzer weitergeben kann. Zweitens muss es den Anforderungen aus der Anwendung des haptischen Renderings in einer IMS entsprechen. Damit soll dem Benutzer ein realitätsnaher, sicherer Griff von virtuellen Objekten und deren Feinmanipulation unter physikalisch plausiblen Bedingungen gewährleistet werden.

Auf der Grundlage dieser Voraussetzungen wird eine haptische Objekt-Objekt-Interaktionsstrategie, kombiniert mit VC und der vollständigen Integration des Avatars in die Physiksimulation von Ve<sup>2</sup>, verwendet. Neben dem Einsatz von VC zur Stabilisierung des haptischen Renderings dient es auch zur Kopplung der Physiksimulation mit dem Benutzer. Die Kopplung über VC ist erforderlich, da die positionsgesteuerte Benutzerinteraktion aus den kinematischen Vorgaben des CyberGrasp<sup>TM</sup> für die Handglieder nicht geeignet ist, mit den in der Kraft-basierten Physiksimulation integrierten einzelnen Avataren der Fingerglieder zu kommunizieren. Als Avatar für die haptische Interaktion in Ve<sup>2</sup> dienen jeweils nur die äußersten (distalen) fünf Fingerglieder. Diese Einschränkung gilt nur für das haptische Rendering. Die Manipulation virtueller Objekte hingegen erfolgt mit einem vollständigen Handmodell aus 15 Fingergliedern und der Handfläche. Die Vereinfachung des haptischen Renderings ist im Falle der IMS zulässig, da für die meisten zur Feinmanipulation geeigneten Griffarten die Fingerspitzen den maßgeblichen Anteil an der Kraftübertragung zwischen virtuellem Objekt und Benutzer übernehmen (vgl. Abbildung 3.2).



Die räumliche Kollisionsgeometrie der Fingerspitzen ist aus Performanzgründen nicht als Polygonmodell oder durch eine Punktwolke abgebildet, sondern durch eine Minkowski-Summe aus einer Kugel und einem Geradenstück angenähert (siehe Abbildung 4.5). Dadurch vermindert sich die Anzahl der von der Kollisionserkennung zu berücksichtigenden Geometrien von der Anzahl der einzelnen Polygone eines Fingerglieds auf ein einziges Element, bestehend aus einem Zylinder mit abgerundeten Ecken.

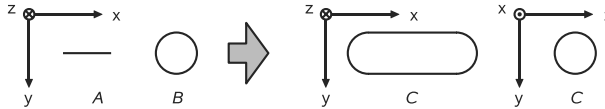


Abbildung 4.5: Annäherung der Geometrie von Fingergliedern durch die Minkowski-Summe  $A+B$  eines Geradenstücks  $A$  und einer Kugel  $B$  zu einem Zylinder mit abgerundeten Enden  $C$

Die Oberflächenkräfte, die im haptischen Renderingverfahren für  $Ve^2$  berechnet werden, reduzieren sich auf die Reibkräfte, die indirekt über die Physiksimulation abgebildet werden. Es kann allerdings nur der Anteil der Reibkräfte durch den CyberGrasp<sup>TM</sup> an den Benutzer übertragen werden, der eine Auslenkung der simulierten Fingerspitzen in Richtung der z-Achse im Koordinatensystem der realen gemessenen Position verursacht (vgl. Abbildung 4.6). Aufgrund der geringen Steifigkeit des mechanischen Übertragungssystems des CyberGrasp<sup>TM</sup> wurde auf ein haptisches Rendering mit Texturen verzichtet. Auf Force-Shading wurde ebenfalls verzichtet, da der CyberGrasp<sup>TM</sup> als tragbares Gerät nicht für die Oberflächenexploration geeignet ist. Zudem handelt es sich bei den Avataren um Zylinder mit abgerundeten Ecken ohne polygonaler Näherung, wodurch aufgrund der durchgehend stetig differenzierbaren Oberfläche keine durch den Avatar verursachten Kraftsprünge auftreten können. Die Kraftberechnung an einer Fingerspitze erfolgt im Kontakt mit einem virtuellen Objekt (siehe Abbildung 4.6) über das VC mittels eines Haptic Fingertip (HFT) und eines Ideal Haptic Fingertip (IHFT) folgendermaßen:

Im Falle einer freien Bewegung entspricht der HFT ungefähr der Position und Orientierung des IHFT. Da der HFT direkt durch die Bewegungen des CyberGrasp<sup>TM</sup> gesteuert wird und nur über eine VC mit dem IHFT gekoppelt ist, dessen Position und Orientierung durch die Physiksimulation bestimmt werden, sind der HFT und der IHFT nie genau deckungsgleich. Diese durch die Benutzerbewegungen verursachten Auslenkungen und die damit auftretenden Kopplungskräfte werden jedoch nicht an den Benutzer zurückgekoppelt. Tritt ein Kontakt der Fingerspitzen mit einem Objekt auf, verhindert die Physiksimulation in  $Ve^2$  ein Eintauchen der IHFT in das entsprechende Objekt (vgl. Ab-

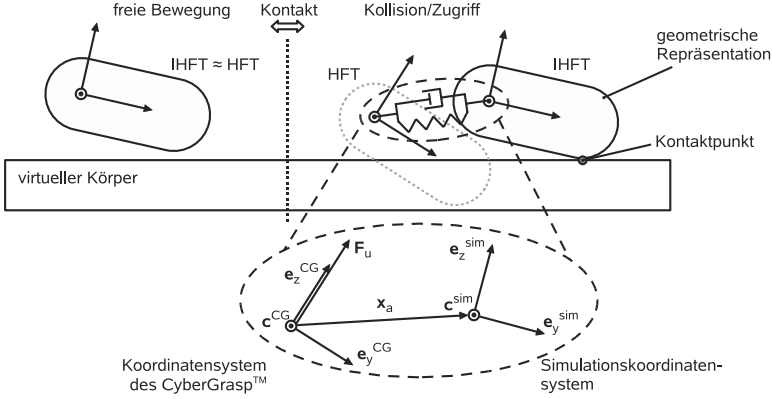


Abbildung 4.6: VC und haptisches Rendering in  $Ve^2$  am Beispiel einer Fingerspitze

schnitt 3.4.3). Dadurch wird die simulierte Fingerspitze von der durch den CyberGrasp<sup>TM</sup> vorgegebenen Position der HFT ausgelenkt. Die an dem distalen Fingerglied entstehende Kontaktkraft  $\mathbf{f}_{cd}$  wird durch

$$\mathbf{f}_{cd} = k_s \cdot \mathbf{x}_a + k_d \cdot \frac{\Delta \mathbf{x}_a}{\Delta t} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} k_d \neq 0 & \text{für } \frac{\Delta \mathbf{x}_a}{\Delta t} \geq 0 \\ k_d = 0 & \text{für } \frac{\Delta \mathbf{x}_a}{\Delta t} < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

berechnet. Dabei sind  $k_s$  und  $k_d$  die Steifigkeit bzw. die Dämpfung der virtuellen Kopplung und  $\mathbf{x}_a$  die Auslenkung.  $\frac{\Delta \mathbf{x}_a}{\Delta t}$  ist die Veränderung der Auslenkung  $\Delta \mathbf{x}_a$  über einen Zeitschritt  $\Delta t$  der Simulation. Der an den Benutzer zurückgekoppelte Kraftanteil  $\mathbf{F}_u$  mit

$$\mathbf{F}_u = \delta \mathbf{f}_{cdz} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} \delta = 0 & \text{für } f_{cdzi} \leq 0 \\ \delta = 1 & \text{für } f_{cdzi} > 0 \end{cases} \quad \text{mit } i = 1, \dots, 5 \quad (4.14)$$

ist nur der Anteil der lokalen positiven z-Achse  $\mathbf{f}_{cdz}$  einer Fingerspitze  $i$ , mit  $i = 1, \dots, 5$ . Nur diese Kraft kann durch den CyberGrasp<sup>TM</sup> übertragen werden. Die Rückkopplung weiterer Kraftanteile würde zu nicht eindeutigen haptischen Informationen für den Benutzer führen, bzw. unerwünschte Anziehungseffekte zur Folge haben. Löst sich der Kontakt wieder, wird die Kraftübertragung an den Benutzer unterbrochen. Die berechneten Kopplungskräfte dienen allein der Synchronisation der gemessenen Positionen und Orientierungen mit den Positionen und Orientierungen der in der Physiksimulation berechneten virtuellen Fingerglieder.

# 5 Umsetzung von Ve<sup>2</sup>

## 5.1 Inhalt des Kapitels

In diesem Kapitel werden die Struktur und die konkrete technische Umsetzung des speziell entwickelten VR-Systems Ve<sup>2</sup> beschrieben. Dieses Kapitel untergliedert sich in folgende Schwerpunkte: Systemarchitektur, Systemabläufe und Systemkonfiguration. In dem Abschnitt *Systemarchitektur* wird die grundlegende Datenstruktur des Systems und seiner Komponenten erläutert. Der Abschnitt *Systemabläufe* beschreibt die zur Berechnung und Visualisierung abhängigen parallelen und hintereinander geschalteten Berechnungsprozesse. Abschließend wird die *Systemkonfiguration* dargestellt.

## 5.2 Systemarchitektur

### 5.2.1 Allgemeines

Das in Kapitel 4 beschriebene Konzept für eine virtuelle Montagesimulation sowie die in Kapitel 3 gezeigten technischen Aspekte und erforderlichen Systemkomponenten sind in Ve<sup>2</sup> zu einem gesamtheitlichen Ansatz verknüpft. Bei der Implementierung von Ve<sup>2</sup> wurde nicht nur die prototypenhafte Umsetzung eines reinen Forschungssystems angestrebt, sondern es wurde auch die leichte Erweiterbarkeit für einen möglichen praktischen industriellen Einsatz mit berücksichtigt. Im weiteren Verlauf werden die grundlegenden Software-Strukturen und Designentscheidungen erläutert.

Die Architektur von Ve<sup>2</sup> ist objektorientiert und in der Programmiersprache C++ implementiert. Die hier für die Beschreibung der Systemarchitektur gewählte Sprache ist die Unified Modeling Language (UML). Die in dieser Arbeit verwendeten Elemente aus dem Sprachumfang von UML sind im Anhang A explizit aufgeführt.

### 5.2.2 Grundstruktur

Die grundlegende Struktur von Ve<sup>2</sup> untergliedert sich, wie in Abbildung 5.1 gezeigt, in mehrere Softwarepakete, die für sich jeweils funktionale Einheiten mit spezifischen Aufga-

ben sind. Zur besseren Kenntlichkeit der Softwarekomponenten im Fließtext sind in der folgenden Beschreibung Softwarepakete, die mehrere Klassen beinhalten, in **fett** dargestellt; einzelne Klassen in *kursiv*.

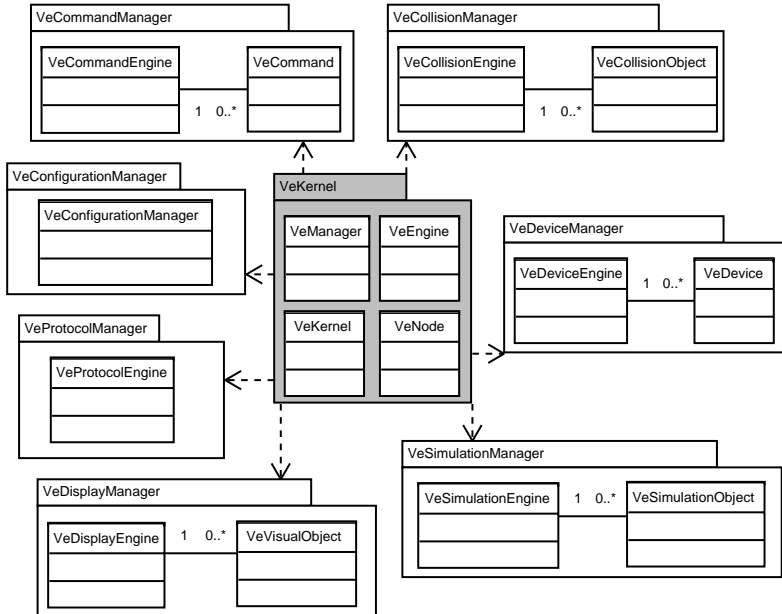


Abbildung 5.1: Grundlegende Softwarepakete und Klassen der Manager-basierten Struktur von  $Ve^2$

Der **VeKernel** ist das zentrale Softwarepaket und fasst alle Klassen zusammen, die die funktionale Basis für Ve<sup>2</sup> bilden. Die wichtigsten Klassen dieses Pakets sind *VeKernel*, *VeManager*, *VeEngine* und *VeNode*. In der Klasse *VeKernel* laufen alle Systeminformationen zusammen und werden entsprechend koordiniert und synchronisiert. Der Hauptprozess in Ve<sup>2</sup> wird durch diese Klasse gestartet und gesteuert. Die Klasse *VeManager* stellt die übergeordnete Klasse aller Manager dar und dient dazu, den Zugriff vom *VeKernel* auf die restlichen, im Folgenden näher erläuterten Manager zu vereinheitlichen. Die Klasse *VeEngine* ist die funktionale Basis für die Prozessparallelisierung, da sie die Funktionalität bereitstellt, Unterprozesse vom Hauptprozess abzuspalten, wobei diese dennoch vom Hauptprozess aus kontrolliert werden können. Alle im Folgenden beschriebenen Klassen mit dem Namenszusatz *Engine* sind eine Spezialisierung dieser Klasse. Im Gegensatz dazu

ist die Klasse *VeNode* die übergeordnete Struktureinheit, in der die Informationen über die darzustellenden und zu berechnenden einzelnen Szeneobjekte zusammengefasst sind. Von ihr werden auch die Synchronisationsmechanismen für die gegenseitige Aktualisierung der einzelnen Szeneobjekte bereitgestellt.

Das Paket **VeConfigurationManager** umfasst die gleichnamige Klasse und damit die erforderlichen Funktionen, persistente Daten zu handhaben. Diese werden zur Laufzeit durch den *VeConfigurationManager* den restlichen Modulen zur Verfügung gestellt. Die für die Konfiguration erforderlichen persistenten Daten enthalten Informationen über die Systemkonfiguration und über die Szenekonfiguration.

Das Paket **VeDeviceManager** stellt die  $\text{Ve}^2$ -Gerätetreiber für die Standardeingabegeräte, die 3-D-Positionserfassungssysteme und die haptischen Interaktionsgeräte zur Verfügung. Die speziell von der Klasse *VeDevice* abgeleiteten Gerätetreiber laufen jeweils asynchron zum Hauptprozess in einem von einem *VeDeviceEngine*-Objekt zur Verfügung gestellten eigenen Unterprozess. Dadurch können die teilweise sehr unterschiedlichen Reaktionszeiten der Geräte berücksichtigt werden, ohne sich gegenseitig zu blockieren oder den Hauptprozess zu verlangsamen.

Die Funktionen und Klassen für die Handhabung der Kollisionserkennung sind in dem Paket **VeCollisionManager** zusammengefasst. Die zentrale Klasse ist die *VeCollisionEngine*, die den eigentlichen Kollisionserkennungsalgorithmus kapselt, in einen eigenen Unterprozess umwandelt und Kontrollmechanismen bereitstellt. Je nach der eingesetzten externen Kollisionserkennungsbibliothek wird davon die spezielle Klasse wie z. B. *VeCollisionEngineSolid* für die aktuell eingesetzte Kollisionserkennung SOLID (siehe Abschnitt 4.4.4) abgeleitet. Die Kapselung und Verwaltung der einzelnen geometrischen Kollisionsobjekte übernimmt die Klasse *VeCollisionObject* bzw. die der *VeCollisionEngine* entsprechenden spezialisierten Ableitungen.

Vergleichbar mit dem Paket **VeCollisionManager** sind in dem Paket **VeSimulationManager** alle Klassen zusammengefasst, die für die Kontrolle der Physiksimulation in  $\text{Ve}^2$  verantwortlich sind. Die verwendete Simulationsbibliothek wird dabei mit der entsprechenden Ableitung der Klasse *VeSimulationEngine* gekapselt. Die dazugehörigen Simulationsobjekte, die die physikalischen Informationen wie Masse, Trägheitstensor und Schwerpunkt, die aktuelle lineare und rotatorische Beschleunigung, die Geschwindigkeit und die Position bzw. Orientierung beinhalten, werden durch die spezifische Ableitung der Klasse *VeSimulationObject* gekapselt und verwaltet.

Die visuelle Darstellung der Szene wird von den in dem Paket **VeDisplayManager** untergliederten Klassen ermöglicht. Analog zu den Paketen der Kollisionserkennung und Physiksimulation werden die grundlegenden Funktionen der unterschiedlichen 3-D-Visualisierungsbibliotheken in der jeweiligen Spezialisierung der Klasse *VeDisplayEngine* gekapselt.

Die konkreten visuellen geometrischen Informationen, Positions- und Rotationsinformationen sowie Beleuchtungs- und Farbinformationen der Szeneobjekte sind hingegen in den jeweiligen Spezialisierungen der Klasse *VeVisualObject* gekapselt.

Zur Aufzeichnung der Daten während einer IMS fungiert das Paket **VeProtocolManager** mit der gleichnamigen Klasse *VeProtocolManager*. Welche Daten aufgezeichnet werden sollen, wird vorab in den Konfigurationseinstellungen festgelegt und steht dem *VeProtocolManager* über das *VeConfigurationManager*-Objekt zur Verfügung. Obwohl Ve<sup>2</sup> als ein immersives System mit dem Schwerpunkt auf einer direkten Interaktion ausgelegt ist, kann optional ein 3-D-Menü eingeblendet werden. Die Klassen des Pakets **VeCommandManager** dienen dazu, die einzelnen Menüpunkte mit den expliziten Befehlen zu verwalten und abzuarbeiten. Die in den spezialisierten *VeCommand*-Klassen zusammengefassten Befehlsinformationen wie z. B. die des Befehls *VeCommandExit* zur Beendigung der IMS werden in der Klasse *VeCommandEngine* registriert und abgearbeitet.

### 5.2.3 Szenegraph

Szenegraphen sind die meistverbreitete Datenstruktur zur Darstellung von Objekten in virtuellen Umgebungen. Ein Szenegraph ist, entsprechend einer Baumstruktur, ein gerichteter und azyklischer Graph. Diese hierarchische Struktur beschreibt eindeutig die Position und Orientierung jedes Szeneobjekts/Knotens und legt die Abhängigkeiten von den übergeordneten Knoten, den sog. Eltern-Knoten, fest. Jeder Knoten hat nur einen Bezug zu einem übergeordneten Knoten, kann aber mehrere Bezüge zu untergeordneten Knoten, sog. Kind-Knoten, haben. Die so entstehenden Sub-Graphen werden alle in einer hierarchischen Struktur zusammengefasst, die von einem zentralen Knoten, dem Root-Knoten, ausgeht. Je nach Ausgestaltung des Szenegraphen in Abhängigkeit der Spezifikationen wie z. B. die des VRML-Szenegraphen können die Knoten u. a. Informationen über Skalierung, Material und physikalische Attribute enthalten. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft einen sehr einfachen Szenegraph eines virtuellen Montageszenarios in Ve<sup>2</sup>, bestehend aus neun Knoten. Dabei ist die virtuelle Hand als Benutzeravatar aus Gründen der Übersichtlichkeit zu einem Knoten *VeNodeHand*-Knoten zusammengefasst, ohne die einzelnen Handglieder darzustellen. Der Ursprung der Szene liegt in dem *VeNodeRoot*-Knoten. Die drei Knoten *VeNodeCamera*, *VeNodeLight*, *VeNodeHand* dienen zur Einstellung der Perspektive, zur Ausleuchtung und zur Systeminteraktion. Der rechte Ast des Strukturbaums hingegen enthält die eigentlichen Szeneobjekte zur Darstellung des Montageszenarios. Durch den Knoten *VeNodeDocument* werden die Szeneobjekte zusammengefasst und zur leichteren Verwaltung von den Systemknoten separiert. Die Geometrieinformationen der Szeneobjekte werden durch die Knoten *VeNodeGeom* gehalten, die je nach Bedarf durch Struk-

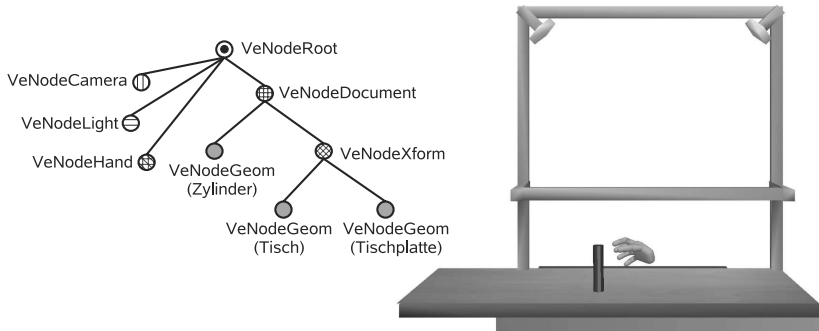
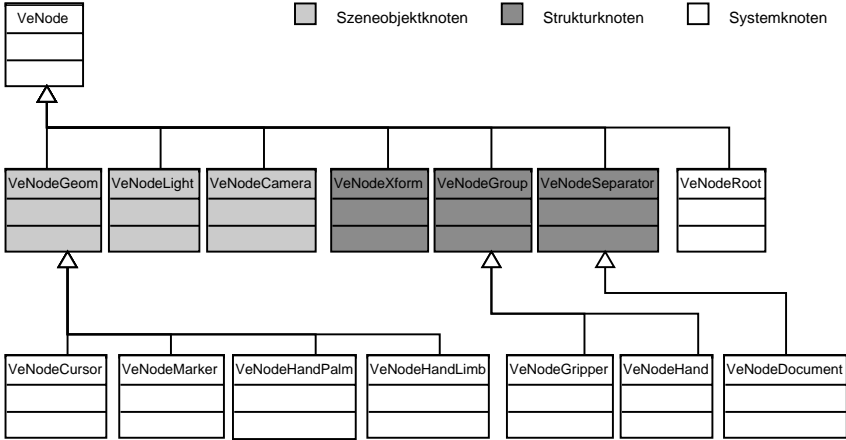


Abbildung 5.2: Beispielhafter Szenegraph in  $Ve^2$  mit einem Tisch, einem Zylinder und einer virtuellen Hand

turknoten wie z. B. den *VeNodeXform* zur gemeinsamen Positionierung zusammengefasst und gruppiert werden können.

Die zum Aufbau eines Szenegraphen in  $Ve^2$  zur Verfügung stehenden Knoten sind in Abbildung 5.3 zusammengefasst. Die Untergliederung der Knoten erfolgt, wie am Beispiel des Szenegraphen aus Abbildung 5.2 beschrieben, in Szeneobjektknoten, in Strukturknoten und in Systemknoten. Alle Knoten sind dabei Spezialisierungen des übergeordneten Knotens *VeNode*. Zu den Strukturknoten gehören die Knoten *VeNodeGroup* und *VeNodeSeparator*, wobei der Knoten *VeNodeGroup* zur reinen Strukturierung dient. Im Gegensatz dazu gruppiert der Knoten *VeNodeSeparator* die untergeordneten Objekte und kapselt sie gleichzeitig vom restlichen Szenegraphen hinsichtlich übergeordneter Parametereinstellungen und Transformationen. Der zusätzliche Strukturknoten *VeNodeXform* ermöglicht die einfache gleichzeitige Transformation sämtlicher untergeordneter Kindknoten. Die Systemknoten sind spezielle Knoten, die nicht durch das virtuelle Montageszenario beeinflusst werden, sondern vom System zur Kontrolle der Szene und zur Benutzerinteraktion fest definiert sind. Die Bezeichnung der Knoten entspricht dabei ihrer Funktionalität.

Einen besonderen Knoten stellt der Knoten *VeNodeGeom* dar, der die Geometrie und Informationen der visuellen Abbildung und je nach Konfiguration auch die Informationen für die Kollisionserkennung und die Physiks simulation verwaltet. Die Klassenstruktur dieses Knotens zeigt Abbildung 5.4. Da der *VeNodeGeom* eine Spezialisierung des allgemein übergeordneten *VeNode* ist, verfügt der *VeNodeGeom* über dessen Transformationsmatrix für die Positions- und Orientierungsinformationen und über den Zugriff auf ein *VeVisualObject*, das in diesem Fall ein Geometrieobjekt der Grafikbibliothek *OpenSceneGraph*

Abbildung 5.3: Klassendiagramm der in  $Ve^2$  implementierten Knoten

(OSG) (OPENSCENEGRAPH 2007) ist. Im Hinblick auf die physikalische Abbildung der geometrischen Szeneobjekte umfasst der *VeNodeGeom* auch ein *VeSimulationObject*, das in der gezeigten Konfiguration wiederum eine Datenstruktur der eingesetzten Physiks simulation ODE (SMITH 2004a) besitzt. Zur Berechnung der auftretenden Kollisionen beinhaltet die Klasse *VeNodeGeom* noch ein *VeCollisionObject*, das seinerseits den Zugriff auf die in der verknüpften Kollisionserkennung registrierten Kollisionsobjekte gewährleistet. Die Hauptaufgabe der Klasse *VeNodeGeom* besteht darin, die drei unterschiedlichen Repräsentationen eines Körpers zu jedem Zeitpunkt der Simulation in einem synchronen Zustand zu halten. Dafür dient die von der Klasse *VeNode* überladene Funktion *VeNodeGeom::update()*. Diese synchronisiert nicht nur den  $Ve^2$ -Szenegraph mit dem visuellen Szenegraph, sondern gleicht auch die Transformationsmatrizen der Kollisions- und Simulationsobjekte ab.

Die mathematische Formulierung der Positions- und Orientierungsinformationen der Szeneobjekte im Raum ist in  $Ve^2$  durchgängig durch Transformationsmatrizen  $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  mit einem rotatorischen Anteil  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  und der Position in den kartesischen Koordinaten  $x, y, z$  dargestellt. Trotz der Informationsredundanz des rotatorischen Anteils entspricht dies der üblichen Form für dreidimensionale Szenegraph-basierte Systeme. Im speziellen Anwendungsfall von  $Ve^2$  ist dies ebenfalls keine Einschränkung. Bei den benutzergesteuerten positionsveränderlichen Knoten wie *VeNodeHand* bzw. *VeNodeHandLimb*, *VeNodeHandPalm* oder *VeNodeCursor* werden die Orientierungen von externen Positi-



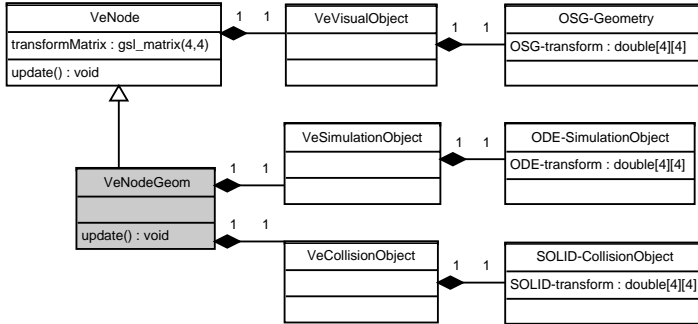


Abbildung 5.4: Komponenten eines Geometrienodes *VeNodeGeom* in *Ve*<sup>2</sup>

onserfassungsgeräten mit jedem Update-Zyklus neu gesetzt. So kann kein kumulativer numerischer Fehler entstehen. Im Falle der durch die Physiksimulation aktualisierten Objekte wird auf die intern in der Physiksimulation verwendete Quaterniondarstellung  $\mathbf{q} = (\mathbf{r}, \varphi) \in \mathbb{R}^4$  zurückgegriffen. Sie beschreibt die Rotationsachse  $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3, |\mathbf{r}| = 1$  und den Rotationswinkel  $\varphi$ . Diese im Vergleich zu den Rotationsmatrizen nicht so anschauliche mathematische Beschreibung enthält keine Informationsredundanz, wodurch sich numerische Fehler hinsichtlich dieses Aspekts nicht von Simulationszyklus zu Simulationszyklus fortpflanzen und aufsummieren können.

## 5.2.4 Handmodell

In einer IMS mit kraftrückkoppelnden Handschuhen kommt dem virtuellen Handmodell als Benutzeravatar eine besondere Bedeutung zu. Dieses dient nicht nur zur Visualisierung der virtuellen Repräsentation der menschlichen Hand, sondern auch als zentrale Kommunikationsschnittstelle für Kraftinformationen zwischen dem System und dem Benutzer. Ein besonderes Augenmerk ist demzufolge auf die geometrisch plausible, aber auch auf die berechnungstechnisch effiziente Modellbildung der virtuellen Hand zu legen.

Da die Mehrzahl aller Menschen – geschätzt 85 bis 90 % – hauptsächlich die rechte Hand für die Durchführung alltäglicher Tätigkeiten gebrauchen (GROSSKOPF 2004, S. 21), wurde im ersten Schritt für die Implementierung von *Ve*<sup>2</sup> die rechte Hand als virtuelle Benutzerrepräsentation gewählt. Da jedoch der Einsatz beider Hände bei einer Vielzahl von Tätigkeiten erforderlich ist oder deren Durchführung stark beschleunigt, wurde die grundlegende Softwarestruktur von *Ve*<sup>2</sup> für eine beidhändige Interaktion vorbereitet.

## Handstruktur

Die statische Klassenstruktur der virtuellen Hand stellt sich, wie in Abbildung 5.5 gezeigt, folgendermaßen dar:

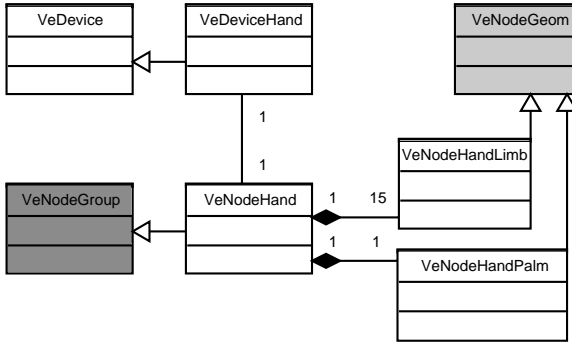


Abbildung 5.5: Software-Struktur des Handmodells mit den Handkomponenten und der Verbindung zu den Hardware-Gerätetreibern auf Klassenebene

Die zugrundeliegenden kinematischen Informationen der einzelnen Fingerglieder sowie die Positions- und Orientierungsinformationen der Mittelhand werden mittels der spezialisierten Klasse *VeDeviceHand* von dem Hardwaretreiber des Positionssenders und des Sensorhandschuhs aufbereitet und an die Klasse *VeNodeHand* weitergeleitet.

Die Klasse *VeNodeHand* ist dabei das zentrale Strukturelement zur Kontrolle der virtuellen Hand. Diese Klasse übernimmt die Verteilerfunktion zur Synchronisation der Gerätedaten mit den in Ve<sup>2</sup> berechneten Daten und besitzt keine eigene geometrische oder physikalische Repräsentation. Die geometrische Ausprägung der Handglieder wird durch 15 Objekte der Klasse *VeNodeHandLimb* für die einzelnen Fingerglieder und durch ein Objekt der Klasse *VeNodeHandPalm* für die Mittelhand realisiert. Die Spezialisierung der Klasse *VeNodeGeom* durch die Knoten der Handglieder ist aus Performanzgründen erforderlich. Ohne diese Unterscheidung würden beim Ladevorgang der visuellen Geometriedateien der Fingerglieder die polygonisierten Strukturen automatisch in die Kollisionserkennung übernommen werden (siehe Abbildung 5.6). So ist es jedoch möglich, den Ladevorgang anzupassen und trotz einer polygonisierten visuellen Geometrie den Handgliedern eine für die Kollisionserkennung optimierte geometrische Darstellungsform zuzuweisen. Ein weiterer Vorteil in der expliziten Unterscheidung der Handglieder von der für normale Szeneobjekte gewählten Darstellung mittels der Klasse *VeNodeGeom* liegt in

der möglichen Verwendung der Fingerglieder als Cursor, was im Falle einer indirekten Interaktion von Bedeutung ist.

### Kollisionshandmodell

Wie schon beschrieben, nimmt das virtuelle Handmodell eine wichtige Schnittstellenfunktion ein. Die Berechnung der Kollisionen zwischen der virtuellen Hand und den Szenenobjekten stellt für den Benutzer die entscheidenden Informationen zur Handhabung der virtuellen Objekte zur Verfügung. Im Gegensatz zu den in der Literatur erwähnten Vorgehensweisen (siehe Abschnitt 3.2.5), zur Modellierung einer virtuellen Hand als Kollisionskörper wird in Ve<sup>2</sup> ein eigener Ansatz verfolgt (siehe Abbildung 5.6).

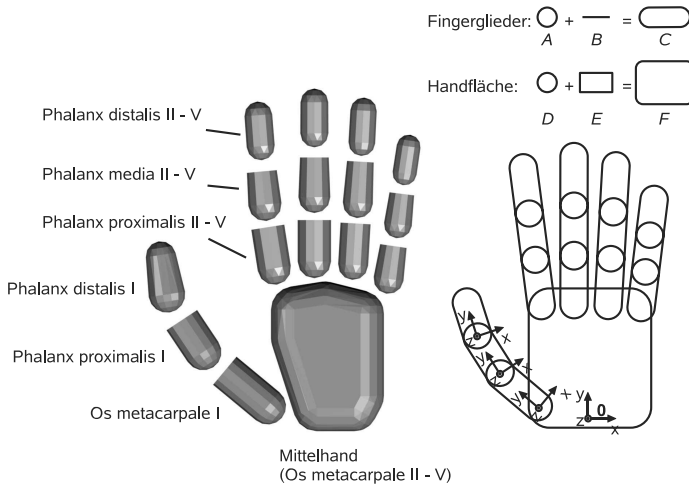


Abbildung 5.6: Explosionsdarstellung der Struktur des Handmodells, basierend auf den polygonisierten visuellen Elementen, und als zusammengesetztes Kollisionsmodell, basierend auf den Minkowski-Summen  $C$  und  $F$

Bei diesem basiert die Näherung der Geometrie der Fingerglieder auf der Minkowski-Summe  $A + B$  eines Geradenstücks  $A$  und einer Kugel  $B$  (siehe Abschnitt 3.4.2). Dies entspricht einem Zylinder mit abgerundeten Enden  $C$ . Die Mittelhand wird entsprechend dazu durch die Minkowski-Summe  $D + E$  einer Kugel  $D$  und einer Box  $E$  zu einem Quader mit abgerundeten Ecken und Kanten angenähert. Der große Geschwindigkeitsvorteil besteht darin, dass für die Kollisionserkennung nicht die einzelnen Polygone der Finger-

glieder, wie in Abbildung 5.6 gezeigt, berücksichtigt werden müssen, sondern die einzelnen Handglieder als jeweils ein einziges konvexes Kollisionsobjekt betrachtet werden können.

Im Vergleich zu den in der Literatur vorgestellten Handmodellen (siehe Abschnitt 3.2.5) können durch diese rechnerisch effiziente Modellierung auch Vorteile hinsichtlich der geometrischen Darstellungsgenauigkeit erreicht werden. So sind Boundingbox-basierte Ansätze ein zwar ebenfalls effizientes Verfahren, durch die Kanten der Hüllgeometrien kann jedoch die natürliche runde Form der Fingerglieder nur ungenügend nachgebildet werden. Punktwolken-basierte Ansätze eignen sich, durch eine hohe Anzahl der Oberflächenpunkte die Geometrie einer menschlichen Hand sehr gut nachzubilden. Dies bedeutet aber einen hohen berechnungstechnischen Aufwand, dem durch eine Reduktion der Oberflächenpunkte nicht begegnet werden kann. Dies würde zu Löchern in der Handoberfläche führen, die sich vor allem bei der Manipulation dünner Körper nachteilig auswirken können. Der Effekt von Lücken zwischen den Kollisionsgeometrien der Handglieder ist auch bei der Annäherung der Kollisionsgeometrie durch Kugeln zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu kann durch die in  $Ve^2$  gewählte Modellierung der Kollisionsgeometrien eine geschlossene Handgeometrie effizient abgebildet werden.

Zur weiteren Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit des Kollisionsmodells der virtuellen Hand wurde das Modell dahingehend vereinfacht, dass die Kollisionen der Handglieder miteinander nicht erkannt werden. In dem Anwendungsfall einer IMS stellt dies keine Einschränkung dar, da sich bei einer an den jeweiligen Benutzer angepassten virtuellen Hand beim Kontakt der virtuellen Handglieder auch die realen Handglieder berühren.

## Simulationshandmodell

Das Simulationshandmodell von  $Ve^2$  besteht wie das visuelle Modell und das Kollisionsmodell aus 15 Objekten für die Repräsentation der Fingerglieder und einem Objekt für die Mittelhand (vgl. Abbildung 5.6). Die einzelnen Glieder werden jeweils durch eine Masse  $m$ , einen Trägheitstensor  $I$  und einen Reibkoeffizienten  $\mu$  definiert. Der Schwerpunkt der jeweiligen Handglieder und der Schwerpunkt Mittelhand liegen in ihrem Koordinatenursprung (siehe Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7).

Durch die visuelle und kollisionstechnische Abbildung der virtuellen Handglieder als Starrkörper kann die Deformierung der Fingerspitze, wie sie bei einem realen Kontakt auftritt, nicht simuliert werden (Abbildung 5.7 Teilbilder a und b). Um dennoch den Eindruck einer geringen Deformation nachzubilden, dienen die Simulationsparameter ERP und CFM der eingesetzten Physiksimulation ODE (siehe Abschnitt 3.4.3). Die Parameter der Physiksimulation der Handglieder sind so eingestellt, dass eine relativ hohe Fehlertoleranz den Kontaktbedingungen zugrunde liegt. Dies entspricht einerseits einer höheren Ober-

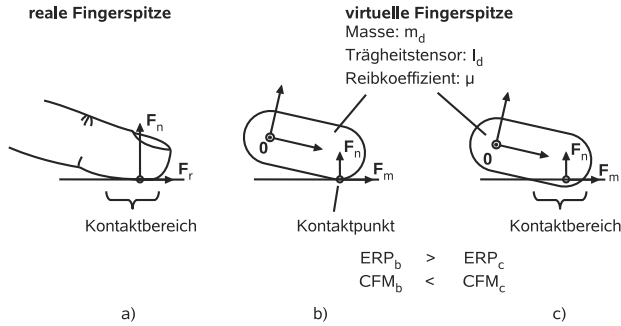


Abbildung 5.7: Schematischer Vergleich eines Oberflächenkontaktes mit dem in  $Ve^2$  implementierten virtuellen Modell eines distalen Fingerglieds

flächendämpfung, andererseits sinkt dadurch die Kontaktsteifigkeit. So entsteht subjektiv der Eindruck, dass es sich bei der Oberfläche der Handglieder um weiches Gewebe mit einer hohen Dämpfung handelt. Optisch resultiert diese Tatsache in einer geringfügigen sichtbaren Durchdringung des manipulierten Körpers mit der virtuellen Hand, was der leichten Abflachung einer realen Fingerkuppe gleichkommt (siehe Abbildung 5.7 - Teilbild c).

## 5.3 Systemabläufe

### 5.3.1 Systemkreislauf

Die bisher in Abschnitt 5.2 vorgestellte Systemarchitektur ist die Perspektive auf die statische Systemstruktur, ohne die zeitlich sequentiellen oder synchronen und parallel asynchronen Abläufe zu betrachten. Die Hauptanforderung, die dabei gemäß Abschnitt 4.2.2 für alle Systemabläufe von  $Ve^2$  gilt, besteht darin, die echtzeitfähige Berechnung einer virtuellen Umgebung zur Durchführung einer IMS unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Hardware zu gewährleisten. Der übergeordnete logische Ablauf, auf den alle Systemprozesse abgestimmt sind, ist der in Abbildung 5.8 gezeigte Systemkreislauf von  $Ve^2$ .

Insgesamt umfasst der Systemkreislauf vier Stufen. Die Teilschritte sind dabei mit (1a) bis (4) nummeriert. Beginnend mit der durch das Interaktionsgerät gemessenen Position und Orientierung des Benutzers und der durch den Sensorhandschuh erfassten Handstel-

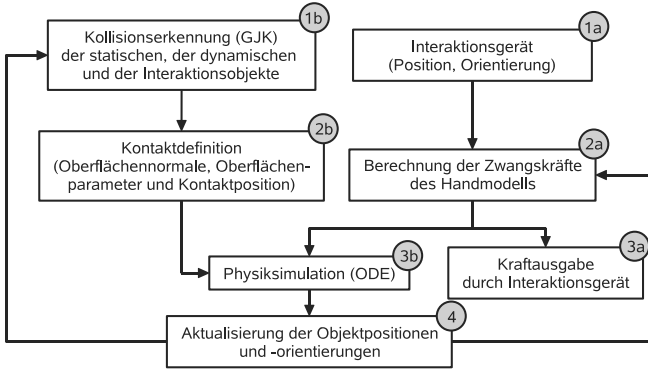


Abbildung 5.8: Übergeordneter Systemkreislauf mit der Simulationsreihenfolge in Abhängigkeit der Benutzerinteraktion

lung (1a), werden die auf den Benutzeravatar wirkenden Zwangskräfte in dem nächsten Schritt (2a) bestimmt. Die Zwangskräfte berechnen sich aus der Abweichung der gemessenen Position bzw. Orientierung und der von  $Ve^2$  berechneten Position und Orientierung des Benutzeravatars. In der darauffolgenden Stufe (3) werden die Zwangskräfte einerseits für das haptische Rendering so aufbereitet, dass diese an den Benutzer zurückgekoppelt werden können (3a). Andererseits werden die Zwangskräfte an die Physiksimulation (3b) weitergeleitet und dienen zur Steuerung des physikalischen Modells der virtuellen Hand. Parallel zu den Stufen (1a), (2a) und (3a) des Systemkreislaufs werden die Kollisionen der in  $Ve^2$  registrierten geometrischen Objekte berechnet und deren Kontaktsituation bestimmt. Die Kollisionserkennung der statischen und dynamischen Szeneobjekte und der Handglieder der virtuellen Hand – vgl. Abschnitt 5.2.4 – wird in Stufe (1b) des Systemkreislaufs durchgeführt und liefert die Ausgangsinformationen, um die Kontakte hinsichtlich der Kontaktposition, der Durchdringungstiefe und der Oberflächennormalen geometrisch festlegen zu können. In Stufe (2b) des Systemkreislaufs werden die geometrischen Kontaktinformationen mit den physikalischen Oberflächeninformationen ergänzt, um dann im darauffolgenden Schritt in der Physiksimulation (3b) ausgewertet zu werden. In der Physiksimulation (3b) laufen so einerseits die extern durch den Benutzer initiierten Systemveränderungen und andererseits auch die internen Veränderungen seit dem vergangenen Simulationszeitschritt durch dynamische Szeneobjekte zusammen. In der vierten Stufe (4) des Systemkreislaufs werden die in  $Ve^2$  registrierten Objekte mit den in der Physiksimulation berechneten neuen Objektpositionen und -orientierungen aktualisiert und mit den visuellen Objektrepräsentationen und den Kollisionskörpern synchronisiert.

### 5.3.2 Prozessstruktur

Der in Abbildung 5.8 in sequentieller Form dargestellte Systemkreislauf entspricht dem logischen Ablauf der Datenverarbeitung. Zugriffe auf reale Rechnerhardware und Interaktionsgeräte sind jedoch mit teilweise erheblichen Unterschieden bei den Zugriffszeiten behaftet. Dadurch ist es erforderlich, zur Laufzeit des Systems die logischen Abläufe zu entkoppeln und parallele Verarbeitungsstrukturen zu schaffen. In Abbildung 5.9 sind die Prozesse von  $Ve^2$  und deren Verbindungen untereinander bei der Durchführung einer IMS dargestellt.

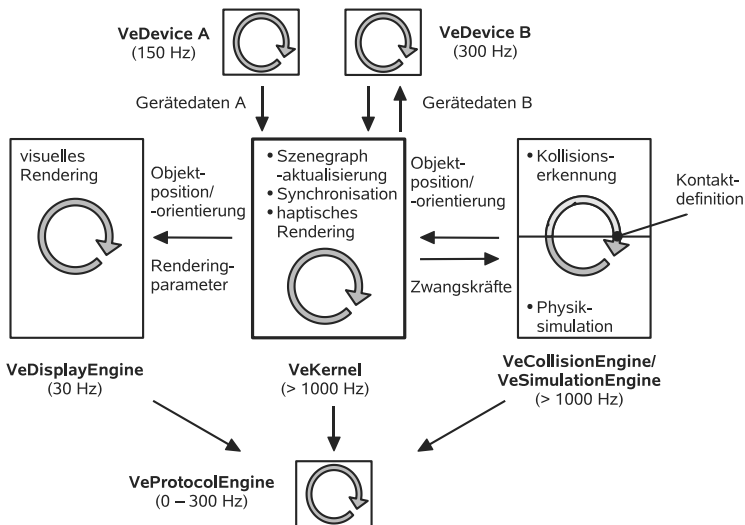


Abbildung 5.9: Schematisches Laufzeitverhalten der Hauptprozesse in  $Ve^2$

Der Hauptprozess ist der **VeKernel**. Dieser sollte entsprechend den Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.2.2) und der Leistungsfähigkeit der Rechnerhardware mit mindestens 1000 Hz oder schneller ausgeführt werden. Der Hauptprozess ist für die laufende Aktualisierung und Synchronisierung des kompletten Szenegraphen, wie in Abbildung 5.2 beispielhaft gezeigt, verantwortlich. Neben dieser Aufgabe ist der **VeKernel**-Prozess für die Kommunikation mit den Gerätetreibern der Interaktionsgeräte verantwortlich. Bei den in Abbildung 5.9 dargestellten Geräten handelt es sich bei **VeDevice A** um ein unilaterales Gerät wie z. B. ein Standardeingabegerät (Maus, Tastatur) oder um ein Positionserfassungsgerät, das laufend Informationen an den **VeKernel** sendet, aber keine Rückkopplung erfordert. Bei dem Gerät **VeDevice B** hingegen handelt es sich um eine bilaterale Kommu-

nikation mit einem kraftrückkoppelnden Interaktionsgerät. Diese Geräte senden Positions- und Orientierungsdaten an den *VeKernel* und erhalten im Gegenzug von diesem Kraftwerte, die an den Benutzer ausgegeben werden. Die Geschwindigkeiten der Prozesse von *VeDevice A* und *VeDevice B* sind stark von der Gerätehardware abhängig und werden dementsprechend jeweils angepasst. Die maximale in  $Ve^2$  angewendete Aktualisierungsrate beträgt 300 Hz. Durch den direkten Informationsaustausch mit den Geräten in Kombination mit der Synchronisation des Szenegraphen übernimmt der *VeKernel* auch die Berechnung des speziellen VC-basierten haptischen Renderings (siehe auch Abschnitt 3.4.4). Parallel zu dem *VeKernel*-Prozess laufen asynchron, aber mit ähnlicher Geschwindigkeit die sequentiell synchronisierten Prozesse der Kollisionserkennung *VeCollisionEngine* und der Physiksimulation *VeSimulationEngine*. Die direkte Laufzeitsynchronisierung mit dem *VeKernel* ist nicht erforderlich, da die Aktualisierung und Synchronisierung des Szenegraphen unabhängig von den jeweiligen aktuellen Kollisions- und Simulationsergebnissen durchgeführt werden kann. Auf die sequentielle Ausführung der Kollisionserkennung und Physiksimulation kann jedoch nicht verzichtet werden, da die Kontaktbestimmung in der Physiksimulation direkt von den jeweiligen Kollisionsergebnissen abhängt. Aufgrund der besseren Verteilung des Berechnungsaufwandes auf die jeweiligen Prozessoren der Rechnerhardware durch das Betriebssystem handelt es sich aber dennoch um zwei getrennte Prozesse. Der asynchrone Prozess der Visualisierung der Szene bzw. des visuellen Renderings stellt den langsamsten Prozess dar. Dieser kann je nach Leistungsfähigkeit der Grafikkhardware 30 bis 50 Hz erreichen. Der Visualisierungsprozess greift nur lesend auf den *VeKernel*-Prozess zu, da für die grafische Ausgabe keine weitere Rückkopplung erforderlich ist. Die großen Laufzeitunterschiede sind keine Einschränkung, da selbst bei Update-Raten von 30 bis 50 Hz die meisten Bewegungen flüssig abgebildet werden. Fehlende Zwischenpositionen von Szeneobjekten aufgrund schneller Bewegungen fallen bei der Visualisierung dem Benutzer in diesem Frequenzbereich noch nicht auf. Ebenfalls ein rein lesender Prozess ist der Prozess der *VeProtocolEngine*. Dieser Prozess sammelt aus allen anderen Prozessen die zur Dokumentation erforderlichen Daten und kann von Aufzeichnungszyklen von über einer Sekunde bis maximal 300 Hz in  $Ve^2$  frei konfiguriert werden.

Die im *VeKernel*-Prozess ablaufende Synchronisation der geometrischen Szeneobjekte *VeNodeGeom* bezüglich ihrer visuellen Darstellungen mit ihren Kollisions- und ihren Simulationsobjekten wird im Aktivitätendiagramm der Funktion *VeNodeGeom::update()* in Abbildung 5.10 gezeigt. Die Positions- und die Orientierungsvorgabe werden dabei immer von dem Simulationsobjekt – falls vorhanden – festgelegt. Eine Umkehrung dieses Informationsflusses würde zu einem unvorhersehbaren Verhalten der Physiksimulation führen, da diese nur Kraftvorgaben verarbeiten kann. Positionsänderungen von Simula-



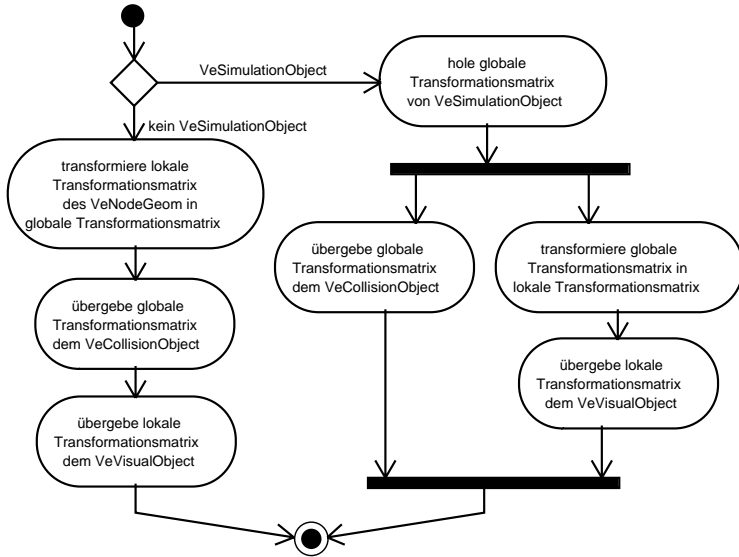


Abbildung 5.10: Aktivitätendiagramm der Synchronisation der visuellen Transformationsmatrizen und der Transformationsmatrizen der Kollisions- und Simulationsobjekte in der Funktion `VeNodeGeom::update()`

tionsobjekten aufgrund von Positionsvorgaben außerhalb der Physiksimulation würden zu einem physikalisch unstetigen, nicht differenzierbaren Objektverhalten führen. Ein unvorhersehbares Objektverhalten wäre die Folge. Nur bei statischen Objekten in  $Ve^2$ , die sich im Falle eines Kontakts mit einem dynamischen Objekt wie eine feste unbewegliche Wand verhalten, kann auf ein Simulationsobjekt für die Vorgabe der Positions- und der Orientierungsinformationen verzichtet werden. Des Weiteren ist die unterschiedliche Berechnungsbasis der Transformationsmatrizen der unterschiedlichen Darstellungsformen zu beachten. So erfordern visuelle Objekte die relativen lokalen Transformationsinformationen, da die Objekttransformationen in visuellen Szenegraphen am effizientesten relativ zum jeweiligen übergeordneten Knoten berechnet werden. Dahingegen sind die Kollisions- und Simulationsobjekte in  $Ve^2$  für sich im Raum unabhängige Einzelobjekte, deren Transformationen somit absolut global gespeichert werden.

### 5.3.3 Handsteuerung

Im Gegensatz zu der Synchronisation von Szeneobjekten, bei der die Positionen und Orientierungen von den Simulationsobjekten vorgegeben werden (Abschnitt 5.3.2), kann diese Vorgehensweise nicht für die Synchronisation der einzelnen Glieder der virtuellen Hand übernommen werden. Dies liegt darin begründet, dass im Unterschied zu den dynamischen Szeneobjekten, die durch die Physiksimulation gesteuert werden, die Kontrolle der Handglieder der virtuellen Hand durch die Kinematik der realen Hand übernommen wird. Zugleich dürfen die Handglieder jedoch ihre physikalischen Eigenschaften nicht verlieren, da sonst eine realitätsnahe und auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhende Manipulation der dynamischen Szeneobjekte durch die Handglieder der virtuellen Hand nicht mehr möglich wäre. Die in  $Ve^2$  gewählte Vorgehensweise ist die virtuelle Kopplung der physikalischen Simulationsobjekte der virtuellen Handglieder mit den gemessenen kinematischen Vorgaben der Benutzerhand. Durch diese indirekte Art der Kopplung können translatorische und rotatorische Abweichungen der Simulationsobjekte der einzelnen Handglieder von den kinematischen Vorgaben in Kräfte und Momente gemäß Gleichungen 5.1 bis 5.4 umgerechnet werden. Dies wird auch in der Abbildung 5.11 verdeutlicht. Es gilt

$$\mathbf{f}_{fc} = -k_s \cdot \mathbf{x}_a - k_d \cdot \frac{\Delta \mathbf{x}_a}{\Delta t} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{t}_{fci} = \mathbf{e}_i^{sim} \times \mathbf{f}_{tci} \quad (5.2)$$

$$\text{mit} \quad \mathbf{f}_{tci} = -k_{st} \cdot \mathbf{l}_{ai} - k_{dt} \cdot \frac{\Delta \mathbf{l}_{ai}}{\Delta t} \quad (5.3)$$

$$\text{mit} \quad \mathbf{l}_{ai} = \mathbf{e}_i^{sim} - \mathbf{e}_i^{CG}, \quad i = x, y, z. \quad (5.4)$$

Die Zwangskräfte  $\mathbf{f}_{fc}$  berechnen sich aus der translatorischen Abweichung  $\mathbf{x}_a$  und dem einen Federsteifigkeit entsprechenden Faktor  $k_s$ . Zudem wird für die Berechnung der Zwangskräfte die Abweichungsgeschwindigkeit  $\frac{\Delta \mathbf{x}_a}{\Delta t}$  mit dem Dämpfungsfaktor  $k_d$  mit berücksichtigt. Die für die Korrektur der rotatorischen Abweichungen erforderlichen Zwangsmomente  $\mathbf{t}_{fci}$  mit  $i = x, y, z$  werden aus dem Vektorprodukt der Einheitsvektoren der Koordinatenachsen des Simulationskoordinatensystems  $\mathbf{e}_i^{sim}$  und den Differenzzwangskräften  $\mathbf{f}_{tci}$  berechnet. Die Differenzzwangskräfte  $\mathbf{f}_{tci}$  berechnen sich vergleichbar mit den Zwangskräften  $\mathbf{f}_{fc}$  aus einer translatorischen Abweichung  $\mathbf{l}_{ai}$  und deren Veränderung über die Zeit  $\frac{\Delta \mathbf{l}_{ai}}{\Delta t}$  in Verbindung mit dem Steifigkeitsparameter  $k_{st}$  und dem Dämpfungsparameter  $k_{dt}$ . Die Vektoren  $\mathbf{l}_{ai}$  sind die Differenzen der Einheitsvektoren des Koordinatensystems  $\mathbf{e}_i^{sim}$  des Simulationsobjekts und des Koordinatensystems  $\mathbf{e}_i^{CG}$  aus der Vorgabe des kinematischen Skeletts. Sie stellen ein Maß für die rotatorische Abweichung dar. Der Betrag der gewählten Steifigkeits- und Dämpfungsparameter ist einerseits von der Masse  $m_i$  und dem Trägheitstensor  $\mathbf{I}_i$ , mit  $i = p, m, d, palm$  des proximalen, medialen und distalen

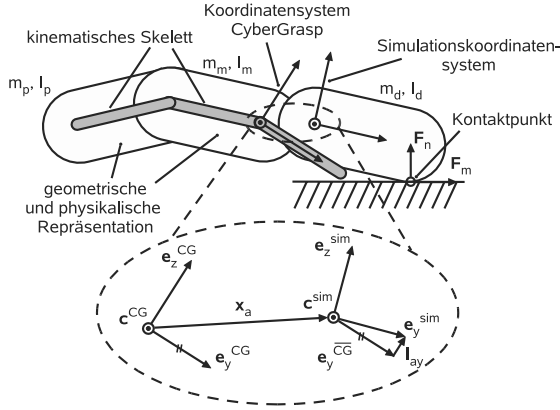


Abbildung 5.11: *Physikalisches Handmodell und die Kopplung der Fingerglieder mit dem kinematischen Skelett der Hand*

Fingergliedes sowie der Mittelhand abhängig. Die gewählten Parameter werden aber andererseits auch in großem Maße von der Aktualisierungsrate des Hauptprozesses von  $Ve^2$  und damit von der zugrundeliegenden Rechnerhardware und der Komplexität der simulierten Szene beeinflusst. Die Einstellung der Parameter erfolgt damit in Abhängigkeit von der zu simulierenden Szene.

Durch die indirekte Kopplung über einen Feder-Dämpfer-Mechanismus treten bei der Berechnung der Simulationsobjekte zwangsläufig Schwingungen auf. Da die Amplituden dieser Schwingungen aufgrund der verhältnismäßig hohen Steifigkeitsparameter sehr gering sind, bleiben diese im Subpixelbereich und können so vom Auge nicht wahrgenommen werden. Da über die indirekte Kopplung auch die Kräfte für das haptische Rendering berechnet werden (vgl. Abschnitt 3.4.4), würden diese Schwingungen die Stabilität des haptischen Regelkreises beeinträchtigen. Zur Reduktion der fühlbaren Schwingungen wird ein einfacher Glättungsfilter zur Bildung eines Mittelwertes über mehrere Simulationszyklen  $N$  eingesetzt (siehe Gleichung 5.5):

$$\mathbf{F}_{um} = \sum_{k=0}^N \frac{\mathbf{F}_u(t_k)}{N}, \quad \text{mit} \quad N = 1, \dots, n \quad (5.5)$$

$\mathbf{F}_{um}$  ist die gemittelte, an den Benutzer zurückgekoppelte Kraft  $\mathbf{F}_u(t)$  aus Gleichung 4.14. Die Anzahl der zu einer ausreichenden Glättung erforderlichen Zeitschritte  $N$  wird wie die Dämpfungs- und Steifigkeitsfaktoren experimentell in Abhängigkeit der zu simulierenden Szene ermittelt. Wird  $N$  zu gering angesetzt, ist auch die Dämpfungswirkung zu gering,

was sich in einer für den Benutzer spürbaren Kontaktinstabilität äußert. Wird hingegen  $F_u$  über einen zu großen Zeitbereich gemittelt, nimmt die Dynamik des Kraftsignals merklich ab. Große Durchdringungen der Handglieder mit den virtuellen Objekten sind die Folge, die wiederum zu Instabilitäten führen können.

### 5.3.4 Anwendungssteuerung

Kern der Benutzerinteraktion einer Physik-basierten IMS mit kraftrückkoppelnden Handschuhen ist die realitätsnahe, direkte Manipulation der Objekte mit der virtuellen Hand, wodurch während einer IMS keine weitere Benutzerinteraktion erforderlich ist. Für die Einrichtung des Szenarios zur Durchführung einer IMS, zur Dokumentation oder bei Anwendungsfällen, die über die realitätsnahe Interaktion hinausgehen, ist in  $Ve^2$  eine erweiterte Steuerung durch den Benutzer möglich. Gemäß der in Abschnitt 3.2.4 vorgestellten Basisinteraktionen sind in  $Ve^2$  Interaktionsmöglichkeiten für:

- die Navigation,
- die Selektion,
- die Objektbewegung und ergänzend
- die Funktionen zur Dokumentation

implementiert. Die Interaktionsmöglichkeit zur Änderung der Objekteigenschaften ist nicht umgesetzt.  $Ve^2$  ist als ein reines Softwarewerkzeug zur Simulation und Analyse konzipiert und unterstützt damit keine Funktionalitäten zur Objektmodellierung. Bei den in  $Ve^2$  implementierten Dokumentationsmöglichkeiten handelt es sich um Funktionalitäten wie die Speicherung der aktuellen visuellen Darstellung oder die Ergänzung der Szene um visuelle Marker.

#### Navigation

Die Funktionen zur Navigation sind einerseits Funktionen zur Mikronavigation wie die Erfassung der Blickrichtung des Benutzers. Dadurch entspricht der gerenderte Kameraausschnitt von  $Ve^2$  der realen Blickrichtung. Diese Navigationsform sollte jedoch nur im Einzelbenutzerbetrieb von  $Ve^2$  eingesetzt werden. Für diejenigen Benutzer, deren Blickrichtung nicht mit erfasst wird, besteht aufgrund der ständigen Bewegungen des gerenderten Kameraausschnitts die Gefahr der Simulatorkrankheit (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Zur Navigation durch größere Szenen andererseits – oder zur Umrundung von Objekten – ohne diese selbst zu drehen, ist in  $Ve^2$  auch eine Makronavigation möglich. Dafür

dienen als Eingabegeräte entweder eine SpaceMouse® oder ein 3-D-Zeigestift (3-D-Stylus) mit einem Eingabeknopf, dessen Bewegungen von einem Positionserfassungssystem aufgezeichnet werden. Die Richtung des 3-D-Stylus gibt die Kamerarichtung vor, wohingegen bei Betätigung des Eingabknopfes die Nulllage des 3-D-Stylus definiert wird. Die Auslenkung von dieser Nulllage bestimmt die Geschwindigkeit der Kamera durch die Szene. Es kann dabei ein sog. Flugmodus, der eine freie Bewegung in drei Dimensionen ermöglicht, eingestellt werden. Außerdem steht ein Gehmodus, der die Kamera in Kopfhöhe des aufrecht stehenden Benutzers fixiert und somit nur eine ebene zweidimensionale Bewegung erlaubt, zur Verfügung.

### **Selektion, Manipulation und Dokumentation**

Die Selektion von Szeneobjekten ist während der Durchführung einer IMS mit kraftrückkoppelnden Handschuhen nicht von Bedeutung, da es sich hierbei um einen Zwischenschritt bei der Objektmanipulation handelt, der bei der direkten realitätsnahen Physik-basierten Interaktion entfällt. Ve<sup>2</sup> ist jedoch auch für Anwendungsfälle ausgelegt, in denen für die Systeminteraktion Cursor-basierte Interaktionsgeräte wie z. B. eine Standardmaus oder ein PHANToM<sup>TM</sup> (Abschnitt 5.4.3) eingesetzt werden können. Da dadurch die Objekte nicht direkt gegriffen bzw. manipuliert werden können, ist die Selektion als ein logischer Zwischenschritt erforderlich. Ebenso ist bei Anwendungsfällen, in denen ein Physik-basiertes Objektverhalten nicht erwünscht ist, die Objektselektion bei der Interaktion mit einer virtuellen Hand vor einer Objektmanipulation notwendig. Durch die Berührung des in Abbildung 5.12 gezeigten 3-D-Knopfes *Selection* mit einem Cursor oder einer Fingerspitze der virtuellen Hand wird Ve<sup>2</sup> in einen Selektionsmodus überführt. In diesem Modus können Szeneobjekte selektiert werden, bis durch eine neuerliche Berührung des 3-D-Knopfes der Selektionsmodus beendet wird und die ausgewählten Objekte gegriffen und bewegt werden können. Ebenfalls über das in Abbildung 5.12 gezeigte 3-D-Menü können die zusätzlichen Dokumentationsfunktionen, wie das Setzen einer Markierung oder die Speicherung der aktuellen Ansicht in einer Bilddatei während einer VR-Sitzung mit der virtuellen Hand oder mit einem 3-D-Cursor, aktiviert werden. Die über das 3-D-Menü auszulösenden Befehle sind auch über Tastatureingaben erreichbar.

## **5.4 Systemkonfigurationen**

### **5.4.1 Allgemeines**

Der implementierte Funktionsumfang von Ve<sup>2</sup> bietet vielfältige Konfigurationsmöglichkeiten, die über die Anwendung von Ve<sup>2</sup> für die IMS hinausreichen. Abbildung 5.13 zeigt alle

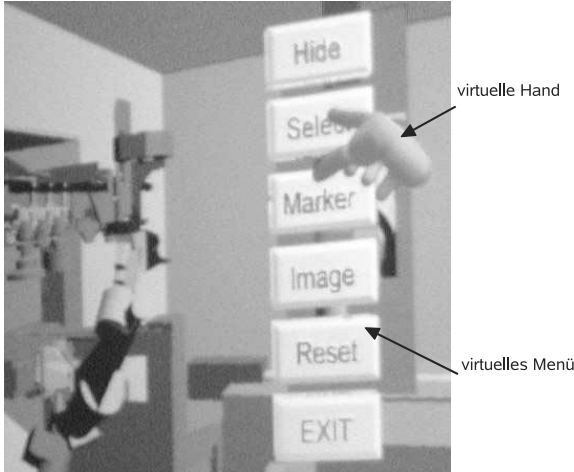


Abbildung 5.12: Virtuelles 3-D-Menü von  $Ve^2$

zur Verfügung stehenden Möglichkeiten auf.  $Ve^2$  ist grundsätzlich für die Anwendung unter den Betriebssystemen Linux, Windows<sup>TM</sup> und dem Unix-Derivat Irix<sup>®</sup> geeignet, wobei die aktuellen Weiterentwicklungen des Systems am *iwb* ausschließlich auf Linux nutzbar sind. Die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten sind im XML-Format über den *VeConfigurationManager* einzustellen. So kann in  $Ve^2$  zwischen einem Monitor, einer Powerwall, einer Holobench oder einem HMD zur Visualisierung ausgewählt werden. Über den *VeDeviceManager* stehen dem Benutzer die Standardeingabegeräte, eine SpaceMouse<sup>®</sup>, die magnetischen Positionserfassungssysteme von Ascension<sup>TM</sup> und Polhemus, das optische Positionserfassungssystem von ART-Track mit 3-D-Stylus, das PHANToM<sup>®</sup> als Cursor-basiertes und kraftrückkoppelndes Interaktionsgerät und der CyberGrasp<sup>TM</sup> zur Verfügung. Die im Zuge der Beschreibung der Funktionalitäten von  $Ve^2$  für die IMS bisher noch nicht erwähnten Manager *VeCommunicationManager* und *VeInteractionManager* ermöglichen es dem Benutzer in Echtzeit  $Ve^2$  mit dem externen Simulationsprogramm Dymola zu koppeln, sowie wahlweise ein 3-D-Menü oder eine Spracherkennung zu aktivieren. Dies erlaubt dem Benutzer, auf einen erweiterten Umfang von Systemfunktionalitäten während der Laufzeit zurückzugreifen. Als ergänzende Konfigurationsmöglichkeit bei der Physiksimulation im *VeSimulationManager* können logische Verbindungen von Szeneobjekten vorkonfiguriert werden. Diese entsprechen der Funktionalität von Snapping-Mechanismen und können flexibel eingesetzt werden, falls dies für den jeweiligen Anwendungsfall als zweckmäßig erscheinen sollte.

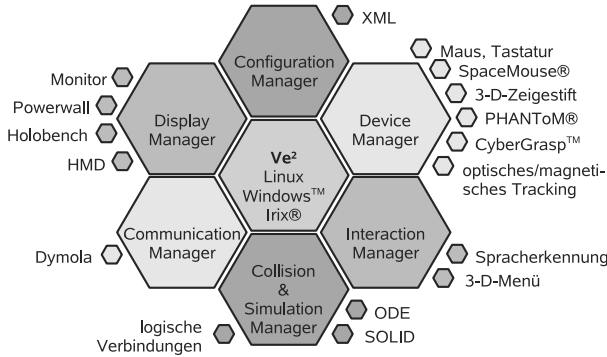


Abbildung 5.13: Gesamtübersicht über alle Konfigurationsmöglichkeiten von  $Ve^2$

### 5.4.2 $Ve^2$ -Dateiformat

Der *VeConfigurationManager* ist die zentrale Datenschnittstelle zu den externen in Dateien gespeicherten Konfigurations- und Szenedaten. Die speziellen  $Ve^2$ -Konfigurations- und Szenedaten sind strukturiert im XML-Format abgelegt. Zur besseren Wiederverwendung von Konfigurationsvarianten des Systems bei wechselnden Szenarien sind die Systemkonfigurationsdaten und die Szenedaten in zwei unabhängigen Dateien getrennt voneinander gespeichert.

### Systemkonfiguration

Die Systemkonfiguration umfasst die Parameter des *VeKernel* und der *VeManager*. Neben den einzelnen Manager-spezifischen Parametern kann die Ausführungsgeschwindigkeit eines jeden *VeManager* bzw. des zugrundeliegenden Prozesses der jeweiligen *VeEngine* (vgl. die Abbildungen 5.1 und 5.9) separat konfiguriert werden. Aktualisierungsraten von 0 bis  $U_{max}$  sind möglich, wobei  $U_{max}$  die unter den gegebenen Hardwarevoraussetzungen maximale Geschwindigkeit bedeutet. Die allgemein für das System geltenden physikalischen Parameter der Szeneobjekte wie die Gravitation, die Oberflächensteifigkeit (ERP) und die Oberflächendämpfung (CFM) werden ebenfalls in der Systemkonfigurationsdatei festgelegt. Ebenso werden die eingesetzten Geräte definiert und parametrisiert. Dabei wird das Positionserfassungssystem für die Messung der räumlichen Position und der Orientierung ebenso festgelegt wie die Skalierungsfaktoren der Handbewegungen und die physikalischen Eigenschaften der Handglieder. Diese unterscheiden sich von den übergeordneten systemweiten Physikparametern, da bei der Simulation von Kontakten zwischen Starrkörpern

die Oberflächen als steif angenommen werden, wohingegen bei der virtuellen Hand die Simulation einer weichen Oberfläche mit einer hohen Dämpfung und einem hohen Reibungsfaktor angestrebt wird.

## Szenedaten

Im Gegensatz zu den beschriebenen Systemdaten handelt es sich bei den Szenedaten um hardware- und systemunabhängige Informationen. Diese beziehen sich rein auf die dynamischen und statischen geometrischen Szeneobjekte, die Szenenperspektive und die Ausleuchtung der Szene mit verschiedenen Lichtquellen. Mit dem ersten Objekt in der Szenedatei wird das erste Objekt in der Ve<sup>2</sup>-Szene bestimmt und damit ein neues Ve<sup>2</sup>-Dokument angelegt (vgl. Abbildung 5.2). Jedes weitere spezifizierte Szeneobjekt wird zu der bestehenden Szene hinzugefügt und mit einer eindeutigen ID versehen. Die Transformationsmatrix kann für die Szenekamera, für jedes Szeneobjekt und jede Lichtquelle separat definiert werden. Die Einstellungsmöglichkeiten der geometrischen Szeneobjekte umfassen zusätzlich die physikalischen Parameter wie Masse und Trägheitstensor, wobei der Trägheitstensor optional anzugeben ist. Fehlt dieser Parameter, so nimmt Ve<sup>2</sup> den Trägheitstensor der Boundingbox bei einer homogenen Masseverteilung des jeweiligen Objekts an, was bei vielen Objektgeometrien eine gute Näherung darstellt. Mit vier weiteren Boole'schen Parametern kann das Verhalten der geometrischen Szeneobjekte auf logischer Ebene parametrisiert werden. So legt der Parameter *collision* fest, ob ein Szeneobjekt in der Kollisionserkennung registriert werden soll oder ob dieses nur für die Visualisierung erforderlich ist. Durch den Parameter *physics* wird ein Szeneobjekt in der Physiksimulation registriert und zeigt damit bei der Durchführung einer IMS physikalisch plausibles Verhalten. Der Parameter *movable* hingegen spezifiziert, ob ein Objekt sich dynamisch frei im Raum bewegen kann. Der letzte Parameter *grabbable* ist speziell auf die Benutzerinteraktion ausgerichtet und legt fest, ob ein Objekt durch die Benutzeravatare wie z. B. einen 3-D-Cursor oder die virtuelle Hand gegriffen werden kann. Als geometrische Datenformate der Szeneobjekte können von Ve<sup>2</sup> aktuell \*.3ds und \*.osg eingelesen werden. Weitere auf einer polygonalen Geometriebeschreibung basierende Formate wie z. B. \*.stl, \*.slp oder \*.wrl können über einen vorhergehenden Konvertierungsschritt problemlos in diese umgewandelt werden.

### 5.4.3 Geräteauswahl

Wie in Abschnitt 5.4.1 dargelegt, bietet Ve<sup>2</sup> die Möglichkeit, verschiedene Ausgabe- und Eingabegeräte miteinander zu verbinden. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen technischen Anforderungen und der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Aspek-



te hinsichtlich einer intuitiven und realitätsnahen Benutzerinteraktion für eine Physik-basierte IMS schränkt sich die Auswahl, wie im Folgenden erläutert, ein.

### **Visuelle Ausgabegeräte**

Die visuelle Ausgabe in  $Ve^2$  ist durch die Ausgabegeräte Monitor, HMD, Holobench und Powerwall möglich. Für eine IMS ist die Visualisierung mittels einer Powerwall am vorteilhaftesten. Die Gründe liegen in der Mehrbenutzerfähigkeit und der Darstellungsgröße. Diese beiden Faktoren sind vor allem bei der Visualisierung mit einem Monitor und einem HMD nicht bzw. nur sehr eingeschränkt gegeben. Die Holobench als zweiseitiges, großflächiges Visualisierungsmedium ist hinsichtlich dieser Faktoren prinzipiell gut geeignet. Durch die beiden Visualisierungsflächen ergibt sich auch ein sehr guter 3-D-Eindruck der virtuellen Szene. Dies ist allerdings nur für einen Benutzer gewährleistet, dessen Blickrichtung vom System mit verfolgt wird. Für weitere Benutzer, die leicht versetzt zur Hauptblickrichtung der Holobench stehen oder bei einem deaktivierten Headtracking wirken sich im praktischen Einsatz die beiden L-förmigen Visualisierungsflächen negativ aus. Es entstehen dadurch sehr starke perspektivische Verzerrungen der Objektgeometrien, die eine Beurteilung der Szene erschweren. Die Powerwall als einseitiges und großflächiges Visualisierungsmedium stellt unter diesen Gesichtspunkten die am besten geeignete Lösung für die geforderte Anwendung dar.

Hinsichtlich der Stereodarstellung der 3-D-Szene wird in  $Ve^2$  eine passive Stereolösung mit Polarisationsfiltern eingesetzt. Die Gründe dafür liegen hauptsächlich in den günstigen Kosten der Technologie, da bei passiven Lösungen beim aktuellen Stand der Technik aufgrund der relativ niedrigen Darstellungsfrequenz auf teure Röhrenprojektoren verzichtet werden kann. Zudem sind die Benutzerbrillen bei dieser Lösung kostengünstiger, da diese nur aus zwei  $90^\circ$  zueinander verdrehten Polarisationsfiltern bestehen und keine aktiven Schaltelemente erfordern. Das geringe Gewicht von passiven Stereobrillen wirkt sich im praktischen Einsatz zusätzlich als vorteilhaft aus.

### **Kraftrückkoppelnde Ausgabegeräte**

Wie in Abschnitt 3.3 hergeleitet, ist für eine realitätsnahe Benutzerinteraktion die direkte haptische Handinteraktion zu bevorzugen, wodurch Cursor-basierte Systeme nicht für die Physik-basierte IMS zum Einsatz kommen. Der einzige kommerziell verfügbare kraftrückkoppelnde Handschuh ist derzeit der CyberGrasp<sup>TM</sup>. Dieser kann in Verbindung mit einem Sensorhandschuh die Handstellung genau erfassen und dem Benutzer die berechneten Interaktionskräfte auf die fünf Fingerspitzen getrennt ausgeben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der CyberGrasp<sup>TM</sup> für den Einsatz zur IMS in Verbindung

mit einer Powerwall um ein speziell entwickeltes Tragesystem erweitert. Dies ermöglicht dem Benutzer, den vollen Aktionsraum vor der Powerwall zu nutzen.

### Positionserfassung

Als Positionserfassungssystem wird das optische System von A.R.T. eingesetzt, das sich unter Berücksichtigung der Kriterien Wiederholfrequenz, Robustheit, Wiederholgenauigkeit und Verdeckung als robustes und zuverlässiges System im praktischen Einsatz bewährt hat. Nachteilig bei diesem System ist die geringe Wiederholfrequenz von ca. 50 Hz. Dies führt zu relativ großen Positionssprüngen von Messzyklus zu Messzyklus. Diese müssen durch das VC der Handglieder ausgeglichen werden und stellen so eine Quelle für Instabilitäten dar. Die Verdeckungsgefahr ist ebenfalls als nachteilig zu bewerten, da Drehungen der Hand so u. U. nicht erkannt werden können. Durch die zusätzliche Ergänzung der Benutzerhand mit weiteren optischen Markern kann dieses Problem jedoch verringert werden. Im Gegensatz dazu bietet das optische System jedoch eine hohe absolute Genauigkeit, ist robust gegenüber Störeinflüssen und hat eine hohe Wiederholgenauigkeit, die im praktischen Betrieb die Benutzerbewegungen korrekt erfasst und keine sichtbaren Bewegungen der virtuellen Hand durch Messungenauigkeiten erzeugt. Im praktischen Vergleich mit magnetischen Messverfahren, wie die von der Firma Ascension<sup>TM</sup> oder Polhemus, sind diese Faktoren für den Einsatz in Ve<sup>2</sup> für eine IMS ausschlaggebend. Vor allem die aufgrund der unvermeidlichen metallischen Gegenstände in der realen Simulationsumgebung auftretenden Feldverzerrungen führen zu großen, vom Benutzer wahrnehmbaren störenden Messabweichungen. Diese können nur durch aufwändige 3-D-Kalibrierungsverfahren ausgeglichen werden, die bei jeder Veränderung der realen Simulationsumgebung erneut durchgeführt werden müssten. Zudem weisen diese Positionserkennungsverfahren deutliche Messabweichungen zwischen den einzelnen Messzyklen auf, die in Verbindung mit dem VC der Physik-basierten virtuellen Hand Schwingungen in die Physiksimulation induzieren. Dies beeinträchtigt spürbar die Stabilität der Physiksimulation und damit die gezielte Manipulation der Szeneobjekte.

### 5.4.4 Gesamtaufbau

Der logische Aufbau und die Verbindungen der in Abschnitt 5.4.3 beschriebenen ausgewählten Geräte für Ve<sup>2</sup>, um eine IMS durchzuführen, sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Der reale Gesamtaufbau von Ve<sup>2</sup> mit den realen Komponenten wird in Abbildung 5.15 gezeigt. Der Benutzer steht bei der Durchführung einer IMS frontal vor der Powerwall und trägt den CyberGrasp<sup>TM</sup> und dessen Aktoreinheit mit dem selbst entwickelten Tragesystem am Körper. Die Aktoreinheit ist über ein stabiles Kabel mit der Kontrolleinheit

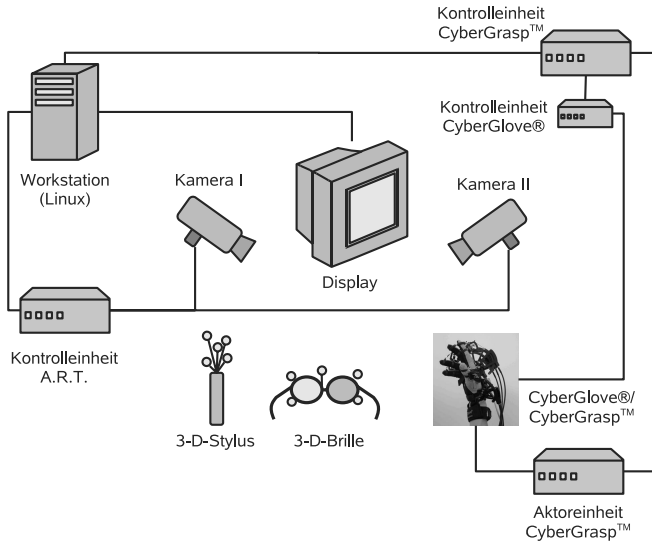


Abbildung 5.14: Logischer Hardwareaufbau von  $Ve^2$

des CyberGrasp<sup>TM</sup> verbunden, die wiederum in unmittelbarer Nähe zum Benutzer aufgebaut ist, um aus Sicherheitsgründen eine sofortige Abschaltung des kraftrückkoppelnden Systems zu ermöglichen. Wahlweise kann der Benutzer zur Mikro- und Makronavigation einen 3-D-Stylus und eine getrackte 3-D-Brille verwenden. Die Kameras zur optischen Positionserfassung sind gegenüber dem Benutzer in Überkopfhöhe angebracht, um das Verdeckungsproblem möglichst gering zu halten. Die Workstation zur Berechnung der Prozesse von  $Ve^2$  und die Kontrolleinheit des Positionserfassungssystems A.R.T.-Track befinden sich nicht im Arbeitsraum des Benutzers, da diese während einer IMS nicht bedient werden müssen.



Abbildung 5.15: Realer Aufbau zur Anwendung des Gesamtsystems  $Ve^2$  für die IMS

## 6 Anwendung und Bewertung

### 6.1 Inhalt des Kapitels

Um das in Kapitel 4 beschriebene Konzept und die gemäß Kapitel 5 implementierte Simulationsumgebung  $Ve^2$  zu bewerten, wurden verschiedene Tests durchgeführt, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Das Ziel dieser Tests war einerseits die technische Machbarkeit und andererseits die Grenzen der Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems  $Ve^2$  aufzuzeigen. Die Anwendungstests umfassten dabei Greiftests verschiedener Objektgeometrien mit Kontakt-, Präzisions- und Kraftgriffen. Des Weiteren wurden aufbauend auf den grundlegenden Greiftests drei unterschiedliche Varianten von formschlüssigen und kraftschlüssigen Objektverbindungen getestet. Um das Verhalten der Performanz des Systems bei Szenen mit mehreren Objekten zu untersuchen, wurde zudem erfolgreich ein einfacher Bestückungstest als Beispielmontage durchgeführt.

Abschließend wird in diesem Kapitel eine technische und wirtschaftliche Betrachtung für den heutigen und den zukünftigen praktischen Einsatz dieser Technologie vorgenommen und es werden die erforderlichen nächsten Entwicklungsschritte aufgezeigt.

### 6.2 Versuchsanwendungen

#### 6.2.1 Testablauf

Der den Tests zugrundeliegende Arbeitsablauf gestaltete sich gemäß der in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Vorgehensweise zur Vorbereitung und Durchführung einer IMS. Das spezielle Ziel der hier gewählten Vorgehensweise war die Beurteilung der Systemeigenschaften und der generellen Anwendbarkeit von  $Ve^2$ . Der durchgeführte Arbeitsablauf ist in Abbildung 6.1 ersichtlich.

In der ersten Phase, der *Vorbereitung*, wurde das System in Abhängigkeit des zu testenden Anwendungsfalls konfiguriert. Dies entsprach bei den folgenden Tests der Hardware-Konfiguration aus Abschnitt 5.4.4. Zur Vorbereitung der virtuellen Szene wurden die

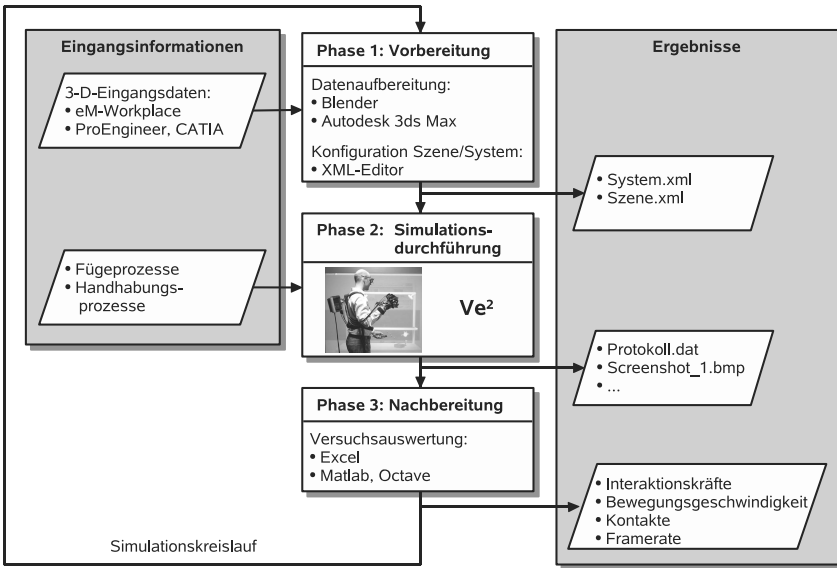


Abbildung 6.1: Ablauf der Anwendungstests von  $Ve^2$

Rohdaten aus anderen 3-D-Simulationssystemen wie z. B. aus eM-Workplace oder aus 3-D-Konstruktionsprogrammen wie ProEngineer oder CATIA importiert. Diese Geometriedatensätze wurden zuvor – falls erforderlich – in eine polygonale Geometriebeschreibung umgewandelt. Zusätzlich war ggf. die Aufbereitung in einem 3-D-Modellierungsprogramm wie Blender oder Autodesk 3ds Max für den Einsatz in einer Echtzeitsimulation notwendig. Die Aufbereitung umfasste vor allem die Überprüfung des Polygonnetzes auf Löcher oder doppelte Polygone und ggf. dessen Korrektur. Löcher oder doppelte Polygone spielen zwar in einer reinen Visualisierungsumgebung keine Rolle, es werden dadurch allerdings die Ergebnisse der Kollisionserkennung und damit der Physiksimulation negativ beeinflusst. Zur visuellen realitätsnahen Darstellung der Szeneobjekte erfolgte neben der geometrischen Aufbereitung auch die visuelle Ergänzung der Objekte mit Texturen. Mittels eines XML-Editors wurden die Konfigurationsdateien für die Szene und das System editiert und die verwendeten Szeneobjekte um weitere Informationen wie deren jeweilige Ausgangsposition und deren jeweilige Masse ergänzt.

In der zweiten Phase, der *Simulationsdurchführung*, erfolgte die Durchführung der zu testenden Handhabungs- und Fügeprozesse. Ein wichtiges Teilergebnis der Simulation ist im

Allgemein die Bewertung des Szenarios und der Prozesse durch den Benutzer. Weitere Ergebnisse der Simulationsdurchführung sind die während der Simulation kontinuierlich gespeicherten numerischen Protokoll Daten und die einzeln aufgezeichneten Bilddaten, die vor allem für die durchgeführten Tests von Bedeutung waren.

Die dritte Phase, die *Nachbereitung*, beinhaltet die Analyse der numerischen Protokoll Daten in Verbindung mit den aufgezeichneten Bilddaten. Die zur Auswertung der Anwendungsversuche eingesetzten Softwarewerkzeuge waren das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft-Excel und die Auswertungs- und Analyseprogramme Octave und Matlab. Mit Hilfe der Auswertungsprogramme wurden die Protokoll Daten so aufbereitet, dass eine Bewertung der Anwendungstests hinsichtlich der aufgetretenen Interaktionskräfte, der Bewegungsgeschwindigkeit der virtuellen Hand, der Anzahl der Kontakte und der Ausführungsgeschwindigkeit der unterschiedlichen Prozesse erfolgen konnte.

### 6.2.2 Testparameter

Die in Tabelle 6.1 aufgeführten Parameter hatten für alle folgenden in Abschnitt 6.2 beschriebenen Versuchsanwendungen den gleichen voreingestellten Wert. Zur Gewährleistung der maximalen Performanz wurde  $Ve^2$  für die Durchführung der Versuchsanwendungen mit der höchstmöglichen Optimierungsstufe des eingesetzten C++-Kompilers g++ übersetzt. Zur Laufzeit von  $Ve^2$  wurden dem Programm die höchstmöglichen Prozessorrechte eingeräumt, so dass die volle Leistungsfähigkeit der Rechnerhardware zur Verfügung stand. Die Aktualisierungsraten der einzelnen internen parallelen Prozesse sind in der Tabelle 6.1 ebenso aufgeführt wie die für alle folgenden Versuche geltenden übergeordneten Physikparameter der virtuellen Umgebung, die die jeweiligen Szeneobjekte beeinflussen.

Die allgemein definierten Physikparameter der virtuellen Hand umfassen die experimentell bestimmten Steifigkeits- und Dämpfungsparameter zur virtuellen Kopplung der virtuellen Hand an das kinematische Skelett des CyberGrasp<sup>TM</sup>. Auch werden durch diese Physikparameter die Oberflächenparameter und Massen der jeweiligen Handglieder definiert. Hinsichtlich der Kraftübertragung beim haptischen Rendering wurde die maximale an den Benutzer zurückgekoppelte Kraft auf 40 % der Maximalkraft des CyberGrasp<sup>TM</sup> und somit auf 4,8 N begrenzt.

### 6.2.3 Greiftests

Der Vorgang des Greifens stellt eine der wichtigsten Grundbewegungen bei der IMS dar. Um die virtuelle Interaktion des Benutzers so wenig wie möglich einzuschränken, müssen die unterschiedlichen Griffarten nach Abbildung 3.2 in einer intuitiven und realitätsnahen

Parameter	Wert	Bedeutung
<b>Kompiler &amp; Betriebssystem</b>		
-O3	-	höchste Optimierungsstufe des Compilers g++
-nice	-n -20	höchste Prozesspriorität bei Linuxprozessen
<b>Aktualisierungsraten</b>		
VeKernel	$U_{max}$	schnellstmögliche Aktualisierung
VeCollisionManager	$U_{max}$	schnellstmögliche Aktualisierung
VePhysicsManager	$U_{max}$	schnellstmögliche Aktualisierung
VeDisplay	30 Hz	grafische Aktualisierungsrate
VeDeviceHand	300 Hz	Aktualisierungsrate des CyberGrasp <sup>TM</sup>
<b>Physikparameter der Umgebung</b>		
$a_y$	$-9,81 \text{ m/s}^2$	Relativbeschleunigung in y-Richtung (Gravitation)
$\mu_s$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	Reibkoeffizient aller Szeneobjekte
h	$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$	Simulationsschrittweite
$CFM_s$	$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m/Ns}$	ODE-spezifische Oberflächendämpfung der Szeneobjekte
<b>Parameter der Hand</b>		
$F_{umax}$	4,8 N	Maximale an den Benutzer zurückgekoppelte Kraft
$\mu_h$	3,0	Reibkoeffizient der Handglieder
$CFM_h$	$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m/Ns}$	ODE-spezifische Oberflächendämpfung der Handglieder
$m_d, m_m, m_p$	$1,0 \cdot 10^{-1} \text{ kg}$	Masse der Fingerglieder
$m_{pa}$	$1,0 \cdot 10^{-1} \text{ kg}$	Masse der Mittelhand
$k_s$	$7,5 \cdot 10^{-1} \text{ N/m}$	translatorische Steifigkeit des VC der Fingerglieder
$k_d$	$7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ns/m}$	translatorische Dämpfung des VC der Fingerglieder
$k_{spa}$	$1,6 \cdot 10^5 \text{ N/m}$	translatorische Steifigkeit des VC der Mittelhand
$k_{dpa}$	$8,0 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}$	translatorische Dämpfung des VC der Mittelhand
$k_s^t$	$7,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}$	rotatorische Steifigkeit des VC der Fingerglieder
$k_d^t$	$2,4 \cdot 10^3 \text{ Ns/m}$	rotatorische Dämpfung des VC der Fingerglieder
$k_{stpa}$	$6,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}$	rotatorische Steifigkeit des VC der Mittelhand
$k_{dtpa}$	$3,2 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}$	rotatorische Dämpfung des VC der Mittelhand

Tabelle 6.1: Allgemeine Parameter für die Versuchsanwendungen und Systemtests

Weise gewährleistet sein. Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Ve<sup>2</sup> wurden Greif- und Manipulationstests mit Kontaktgriffen, Präzisionsgriffen und Kraftgriffen durchgeführt.

## Kontaktgriffe

Zwei unterschiedliche Ausprägungen von Kontaktgriffen wurden getestet. Anhand des ersten Tests sollte nur die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des gewählten Ansatzes zum haptischen Rendering gezeigt werden. Der zweite Test diente zur Bewertung der Manipulation eines flachen Körpers mit einem Kontaktgriff.



Zur grundlegenden Überprüfung des haptischen Renderings mittels des Physik-basierten VC wurden die an den Benutzer zurückgekoppelten Kraftsignale der einzelnen Fingerspitzen getrennt voneinander untersucht. Bei dem Testszenario handelte es sich um eine statische Arbeitsplatte, auf der sich ein dynamisches, d. h. bewegliches Testobjekt befand. Wie in Abbildung 6.2 gezeigt, wurde als Geometrie des Testobjekts ein einfacher Würfel gewählt, um das Systemverhalten bei maximaler Berechnungsgeschwindigkeit bewerten zu können. Die für diesen Versuch speziell eingestellten Parameter und das gemessene Systemverhalten sind in Abbildung 6.3 dargestellt.

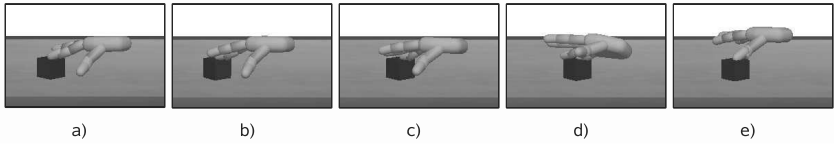


Abbildung 6.2: Bildfolge a bis e des Kontaktversuchs zur Überprüfung des in  $Ve^2$  implementierten haptischen Renderings

Der Versuchsablauf bestand aus fünf getrennten Schritten, in denen jeweils mit einer Fingerspitze der Testwürfel von oben gegen die statische Tischplatte gedrückt wurde. Dabei wurde der jeweilige Finger leicht aufgesetzt, der Druck auf den Körper erhöht und dann der Kontakt wieder aufgehoben. Das Testobjekt sollte dabei seitlich nicht bewegt werden. Die Reihenfolge der Fingerkontakte ging vom Zeigefinger a über den Mittelfinger b, den Ringfinger c und den kleinen Finger d bis hin zum Daumen e. Die Zeitpunkte für die Entstehung der einzelnen Momentaufnahmen a bis e der Abbildung 6.2 sind in dem Diagramm in Abbildung 6.3 jeweils markiert.

Die Auswertung des Versuchs zeigt, dass ein kontrollierter Kontakt der Fingerspitzen mit dem Testobjekt gewährleistet war. Hinsichtlich der Kontaktkräfte  $\mathbf{F}_{um}$ , die auf die Fingerspitzen des Benutzers übertragen wurden, ist ein dem Bewegungsprofil des Benutzers entsprechender Kraftverlauf erkennbar. Der zu Beginn der jeweiligen Berührung sichtbare Zeitverzug zwischen dem erkannten Kontakt und dem gemessenen Kraftverlauf  $\mathbf{F}_{um}$  ist dadurch bedingt, dass Kräfte unter 0,6 N von  $Ve^2$  auf eine nur für die Aufrechterhaltung der minimalen Spannung der Seilzüge des CyberGrasp<sup>TM</sup> erforderliche Kraft reduziert werden. Die Kraftübertragung der sehr leichten Anfangsberührung wird dadurch zwar unterdrückt, jedoch werden die für den Benutzer fühlbaren Kontakt-Instabilitäten aufgrund des VC bei sehr leichten Objektberührungen durch diesen Schwellwert erheblich reduziert.

Die Anzahl der Kontakte ist die Summe aller auftretenden Kontakte der Szene. So wurde,

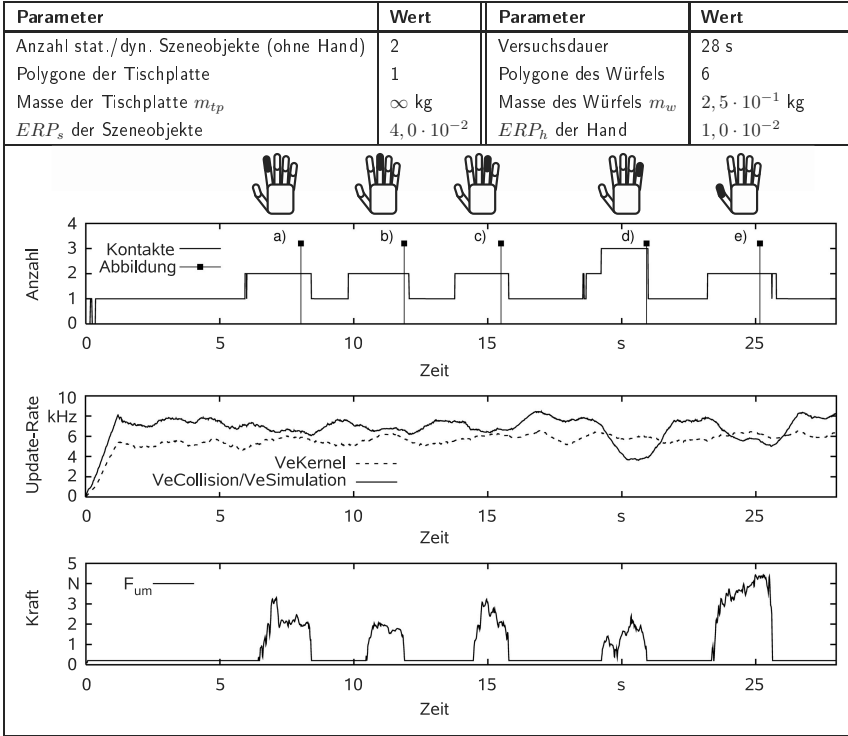


Abbildung 6.3: Verlauf des Kontaktversuchs von jeweils einer Fingerspitze mit einem frei beweglichen Würfel mit den zeitlichen Zuordnungen a bis e zu der in Abbildung 6.2 gezeigten Bildfolge

wie in Abbildung 6.3 erkennbar, auch ohne Berührung durch die Hand immer mindestens ein Kontakt zwischen dem Würfel und der Arbeitsplatte ermittelt. Da die eingesetzte Kollisionserkennung SOLID immer nur die aktuell größte Durchdringung berechnet (siehe Abbildung 4.4), werden Kontaktsituationen zwischen zwei Objekten, auch wenn diese wie in diesem Fall flächig aufeinander liegen, nur durch einen Kontakt repräsentiert. Zum Zeitpunkt d sind während der Berührung des Würfels durch den kleinen Finger drei Kontakte erkennbar. Dieser zusätzliche Kontakt wurde unbeabsichtigt durch das mittlere Fingerglied des kleinen Fingers ausgelöst und hat auf das Versuchsergebnis keinen Einfluss.

Da es sich um eine extrem reduzierte Szene mit nur einem dynamischen und einem statischen Objekt handelte, betrugen die Aktualisierungsraten des Hauptprozesses *VeKer-*

nel und der Kollisionserkennung bzw. der Physiksimulation *VeCollision/VeSimulation* kontinuierlich über 3,8 kHz. Im Gegensatz zu der Ausführungsgeschwindigkeit der Kollisionsberechnung und Physiksimulation, die durch die Anzahl der Kontakte sehr stark beeinflusst wurde, war die Ausführungsgeschwindigkeit des *VeKernel*-Prozesses davon nicht betroffen. Die Geschwindigkeit des Hauptprozesses wird vor allem durch die Anzahl der Objekte in der Szene und durch die Synchronisation mit den Subprozessen bestimmt. Steigt z. B. die Aktualisierungsrate der Kollisionsberechnung, so steigt auch der zur Synchronisation erforderliche Zeitbedarf des *VeKernel*. Dadurch sinkt die *VeKernel*-Ausführungsgeschwindigkeit und ein teilweise gegenläufiges Kurvenprofil, wie in Abbildung 6.3 sichtbar, ist die Folge.

Über die reine Kontaktkraftuntersuchung hinaus beschreibt das Experiment in Abbildung 6.4 eine gezielte Objektmanipulation durch einen Kontaktgriff.

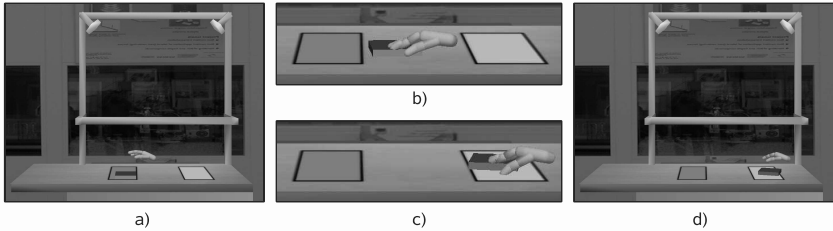


Abbildung 6.4: Bildfolge a bis d des Verlaufs des Kontaktgriffs zur Manipulation einer Platte nur mit Hilfe der Fingerspitzen

Das Versuchsszenario bestand aus einem virtuellen manuellen Arbeitsplatz mit einer statischen Tischplatte, auf der eine Startfläche (dunkelgrau) und eine Zielfläche (hellgrau) markiert waren. Die anderen Teile des Tisches mit Ablage und Beleuchtung dienten nur zu Visualisierungszwecken und waren weder in der Kollisionserkennung noch in der Physiksimulation mit berücksichtigt. Als dynamisches Testobjekt diente eine flache Platte, die zwischen den markierten Flächen mit der virtuellen Hand zu verschieben war. Dabei sollte die Platte nicht seitlich berührt, sondern nur aufgrund der Reibkräfte zwischen der Handinnenfläche des Benutzeravatars und dem Testobjekt manipuliert werden. Die gewählten Versuchparameter sind in Abbildung 6.5 aufgeführt. Das Versuchsergebnis zeigt, dass die Objektmanipulation ausschließlich mittels wirkender Reibkräfte zwischen den Fingerspitzen und dem virtuellen Objekt ausgeführt werden konnte. Durch den um den Faktor zehn höheren Reibkoeffizienten zwischen den Fingerspitzen und dem Testobjekt, verglichen mit dem Reibkoeffizienten Testobjekt/Tischplatte, war eine kontrollierte Manipulation mög-

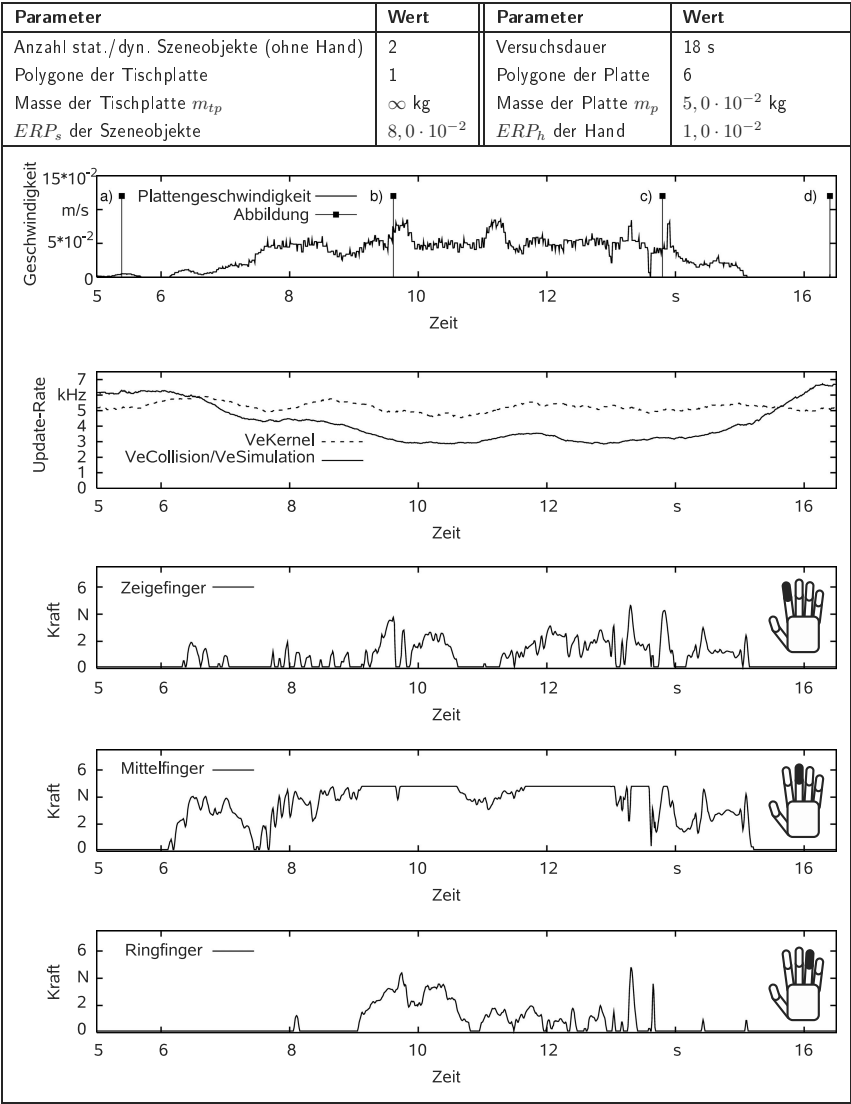


Abbildung 6.5: Zeitlicher Verlauf des Kontaktgriffs zur Manipulation einer Platte nur mit Hilfe der Fingerspitzen

lich. Es ist zudem ersichtlich, dass ohne Umgreifen mit der virtuellen Hand das Testobjekt zwischen den beiden Markierungen nur mit einem Kontaktgriff gezielt verschoben werden konnte. Die dafür erforderlichen Kräfte wurden in diesem Beispiel durch den Zeigefinger, den Mittelfinger und den Ringfinger aufgebracht. Der Mittelfinger drückte mit der für die Verschiebung erforderlichen stabilen Hauptkraft auf das Testobjekt. Der Zeige- und der Ringfinger dienten vorrangig zur seitlichen Stabilisierung des Vorgangs, was sich in den geringeren aufgebrachten Fingerkräften in Abbildung 6.5 zeigt.

Anhand des Experiments wurde deutlich, dass das gewählte Verfahren zum haptischen Rendering bei größeren Kräften sehr stabile Kraftsignale erzeugt. Die an den Benutzer zurückgekoppelte Maximalkraft  $F_{umax}$  beträgt dabei höchstens 4,8 N. Im Falle von geringeren Kräften kann es durch das VC zu undefinierten Schwankungen im Kraftverlauf kommen. Das zeigt sich in den Verläufen der Kräfte für den Zeige- und den Mittelfinger. Dieser Effekt wirkt sich umso stärker aus, je geringer die von dem Benutzer auf die virtuellen Objekte aufgebrachten Kräfte sind. Die Manipulation des Testobjekts ist dadurch jedoch nicht negativ beeinflusst, was sich aus der annähernd konstanten Translationsgeschwindigkeit des Testobjekts auf der Arbeitsplatte ableiten lässt.

Anhand des Kurvenverlaufs der Ausführungsgeschwindigkeit der Kollisionserkennung und der Physiksimulation wird wie im vorherigen Experiment die große Abhängigkeit von der detektierten Kontaktzahl deutlich. Je mehr Finger im Eingriff sind, desto geringer die ist Framerate. Im Gegensatz dazu ist keine direkte Abhängigkeit der *VeKernel*-Aktualisierungsrate von der Anzahl der Finger mit Kontakt zum Testobjekt zu erkennen.

### Präzisionsgriffe

Neben der Durchführung von Kontaktgriffen wurde die Leistungsfähigkeit des gewählten Interaktionsansatzes in *Ve<sup>2</sup>* zur Feinmanipulation von virtuellen Objekten auch in Experimenten mit verschiedenen Varianten von Präzisionsgriffen untersucht. Die Abbildungen 6.6 und 6.7 zeigen die Ergebnisse der kontrollierten Manipulation eines Testobjekts mittels eines zirkularen Präzisionsgriffs. Als Testobjekt diente ein Würfel. Das Testszenario bestand zudem aus einer festen, statischen Unterlage, auf der sich der Würfel in einer ruhenden Ausgangslage befand. Der Testwürfel war das einzige dynamische Objekt in der virtuellen Szene. Die spezifischen Testparameter und Messergebnisse sind in Abbildung 6.7 aufgeführt. Während des 22 Sekunden dauernden Versuchsablaufs wurde das Objekt ausschließlich mit den Fingerspitzen gegriffen, fixiert und angehoben. Im angehobenen Zustand erfolgte die kontrollierte Veränderung der Lage und Orientierung des Testobjekts durch die Bewegung der Finger. Wie aus der Bildfolge in Abbildung 6.6 von Teilbild a bis Teilbild e ersichtlich wird, ist durch die in *Ve<sup>2</sup>* implementierte Interaktion

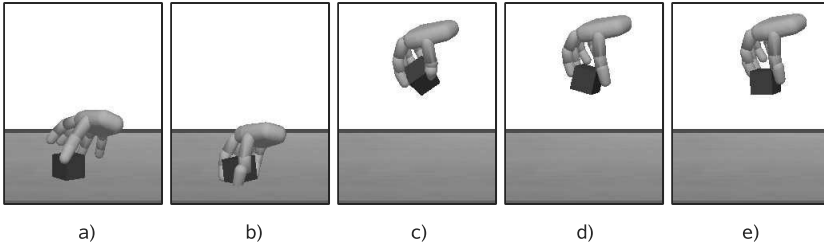


Abbildung 6.6: Bildfolge a bis e des Verlaufs eines zirkularen Präzisionsgriffs am Beispiel eines Würfels

eine präzise Manipulation des Testobjekts möglich. Wie der Kurvenverlauf der Kontaktanzahl verdeutlicht, konnte das Objekt gezielt vom Benutzer aufgenommen und in der Hand mit den Fingerspitzen fixiert werden. Nur während des Vorgangs des Aufhebens wurden neben den Fingerspitzen weitere Fingerglieder eingesetzt. Die relative Lage und die Orientierung des Testobjekts zur virtuellen Hand konnten durch die Bewegungen der virtuellen Finger kontrolliert verändert werden, ohne dass das Objekt ungewollt aus der Hand geglitten wäre. Wie die an den Benutzer zurückgekoppelten Kraftverläufe zeigen, wurde in diesem Experiment die Objektmanipulation vorrangig mit dem Daumen und dem Zeige- bzw. Mittelfinger durchgeführt. Der Ringfinger und der kleine Finger spielten nur beim erstmaligen Greifen und beim Aufnehmen des Testobjekts eine geringfügige Rolle. In Abhängigkeit von der Fingerstellung erfolgte die Fixierung des Testobjekts immer mit dem Daumen und mit einem Finger: Zeigefinger oder Mittelfinger. Der jeweils weniger belastete Finger diente zur Stabilisierung und zur Manipulation des Testobjekts.

Die an den Benutzer zurückgekoppelten Kräfte sind durch ein stabiles Kraftsignal mit Schwankungen im unteren Kraftbereich charakterisiert. Die Objektmanipulation konnte jedoch kontrolliert durchgeführt werden, wie anhand des stabilen nicht oszillierenden Verlaufs der Kontaktanzahl erkennbar ist. Die Oszillation der Kontakte ab der 21. Sekunde des Experiments ist darauf zurückzuführen, dass das fallengelassene Testobjekt auf die Arbeitsfläche auftraf und dabei mehrmals kurz aufsprang.

Zwei weitere Varianten von Präzisionsgriffen, die durch das in  $Ve^2$  implementierte Interaktionskonzept abgedeckt werden, sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Im Unterschied zu dem in Abbildung 6.6 gehandhabten Würfel als Testobjekt zeigt hier die Bilderfolge in Teilbild a einen prismatischen Präzisionsgriff am Beispiel eines länglichen, zylindrischen Testobjekts. Der Zylinder wird dabei mit allen fünf Fingerspitzen fixiert. Die Feinmanipulation des Zylinders kann vergleichbar wie die Feinmanipulation des Würfels durchgeführt

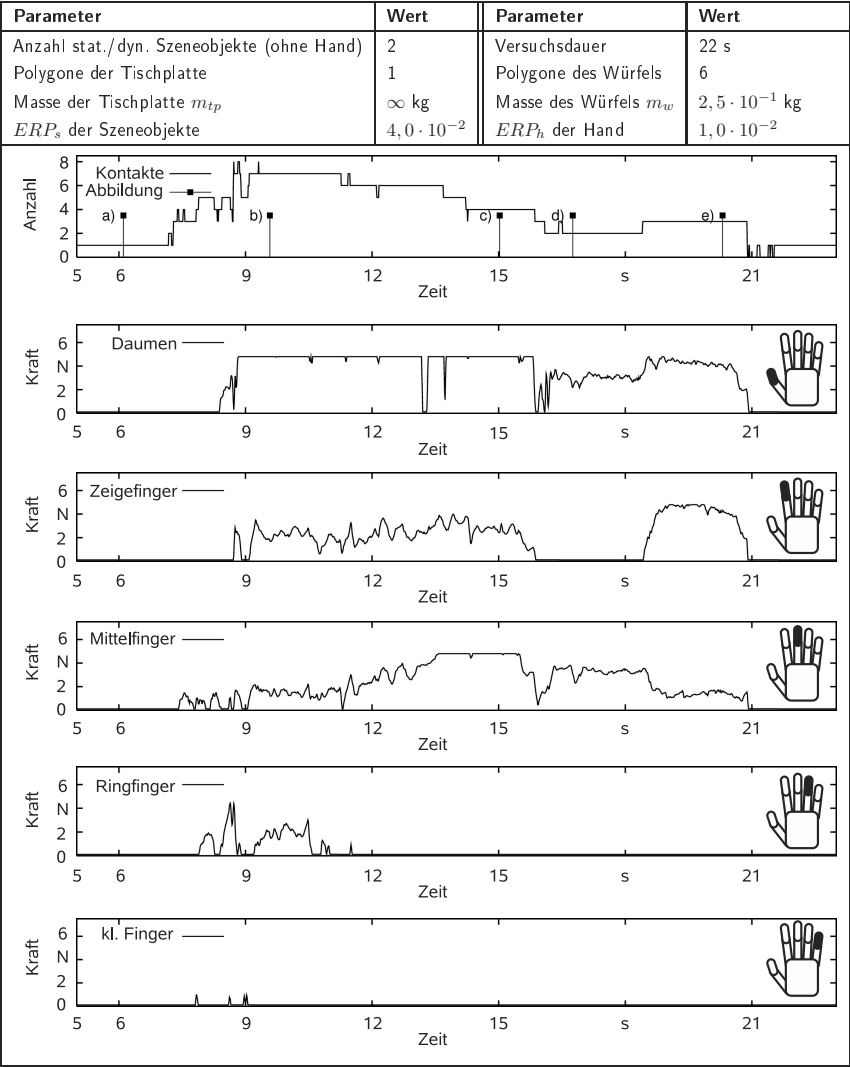


Abbildung 6.7: Zeitlicher Verlauf eines Präzisionsgriffs am Beispiel eines Würfels

werden. Die Bilderfolge von Teilbild b stellt als eine weitere Variante eines Präzisionsgriffs einen zirkularen Präzisionsgriff, anhand einer Kugel als Testobjekt dar. Ein stabiler Griff nur durch die Fingerspitzen kann hier im Gegensatz zu dem länglichen Testobjekt schon mit drei Fingern dem Daumen, dem Zeigefinger und dem Mittelfinger, erfolgen. Die Feinmanipulation der Kugel ist entsprechend der Feinmanipulation des Würfels möglich.

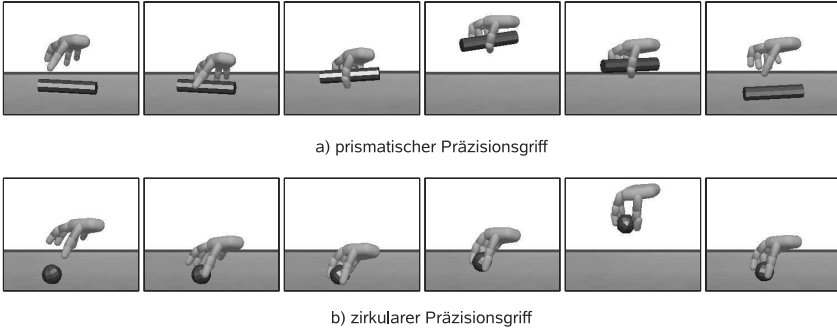


Abbildung 6.8: Objektmanipulation mit einem prismatischen und einem zirkularen Präzisionsgriff am Beispiel eines Zylinders und einer Kugel als Testkörper

### Kraftgriffe

Neben der Manipulation von virtuellen Objekten durch Präzisionsgriffe können durch das Physik-basierte Interaktionsprinzip von Ve<sup>2</sup> auch virtuelle Objekte mit Kraftgriffen entsprechend manipuliert werden. Im Unterschied zu Präzisionsgriffen erfordern Kraftgriffe für einen stabilen Zugriff nicht nur den Einsatz der Fingerspitzen, sondern auch den der restlichen Fingerglieder und den Einsatz der Handfläche der Mittelhand. Dies führt zu einer Vielzahl von Überschneidungen der Handglieder mit dem Testobjekt, die von Ve<sup>2</sup> verarbeitet werden müssen.

Zur Durchführung eines testweisen Kraftgriffs diente ein Szenario mit einem dynamischen zylinderförmigen Testobjekt. Das Testszenario bestand zudem aus einer festen statischen Unterlage. Die Ergebnisse des auch hier ca. 22 Sekunden dauernden Experiments sind in den Abbildungen 6.9 und 6.10 aufgeführt. Während des Versuchsablaufs wird der auf einer Stirnseite stehende Zylinder gegriffen (Teilbild a) und angehoben (Teilbild b). Der angehobene Zylinder wird mit einem Kraftgriff fest in der Hand fixiert (Teilbild c). Zum Abschluss wird der Kraftgriff gelockert. Dabei geht der Kraftgriff zur besseren Feinmanipulation des Testobjekts fließend in einen Präzisionsgriff über. Das Testobjekt wird dann



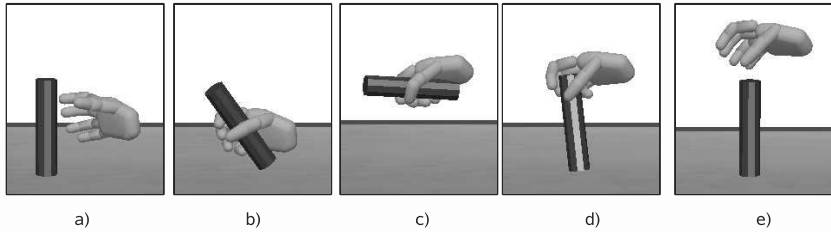


Abbildung 6.9: Bildfolge a bis e des Verlaufs eines Kraftgriffs, in Kombination mit einem Präzisionsgriff zum gezielten Abstellen des Testobjekts am Beispiel eines Zylinders

entsprechend seiner Ausgangslage auf der statischen Unterlage wieder abgestellt (siehe Teilbild d und e).

Der Ablauf des Kraftgriffs in Abbildung 6.10 zeigt, dass auch diese Griffvarianten in  $Ve^2$  gezielt und kontrolliert vom Benutzer bei der Interaktion mit virtuellen Objekten angewendet werden können. Die Kraftverläufe belegen den variablen Einsatz der Finger und der Handfläche für die Objektmanipulation. So dienen zum Aufnehmen und Absetzen des Testobjekts vorrangig der Daumen in Verbindung mit einem oder zwei weiteren Fingern. Im Falle des Kraftgriffs wurden dagegen alle fünf Fingerspitzen und die Handfläche eingesetzt. Die in diesem Experiment maximal neun gleichzeitig detektierten Kontakte zwischen der virtuellen Hand und dem Testzylinder konnten trotz der auftretenden statischen Überbestimmtheit stabil verarbeitet werden.

Die an den Benutzer zurückgekoppelten Kräfte blieben gemäß der vorhergehend beschriebenen Experimente stabil – mit Schwankungen im unteren Kraftbereich. Wie schon bei den Präzisionsgriffen beschrieben, führt dies zu keinem instabilen Systemverhalten und schränkt dadurch die Objektmanipulation nicht ein. Dies kann anhand des kontrollierten Übergangs des Kraftgriffs in einen Präzisionsgriff (siehe Abbildung 6.9 Teilbild c und d) zum definierten Abstellen des Testzylinders in der metastabilen, aufrechten Lage gezeigt werden.

In Ergänzung zu dem beschriebenen Experiment eines prismatischen Kraftgriffs anhand eines länglichen Testobjekts sind in Abbildung 6.11 zirkuläre Kraftgriffe am Beispiel kompakter Körper wie die eines Würfels und einer Kugel dargestellt. Anhand der Bilder ist deutlich der Unterschied der Fingerstellung im Gegensatz zu den schon beschriebenen Präzisionsgriffen (Abbildung 6.6 und 6.8) zu erkennen. In Abhängigkeit der Objektgeometrie liegen die Fingerglieder durchgehend eng an den Körpern an. Das Objekt wird durch

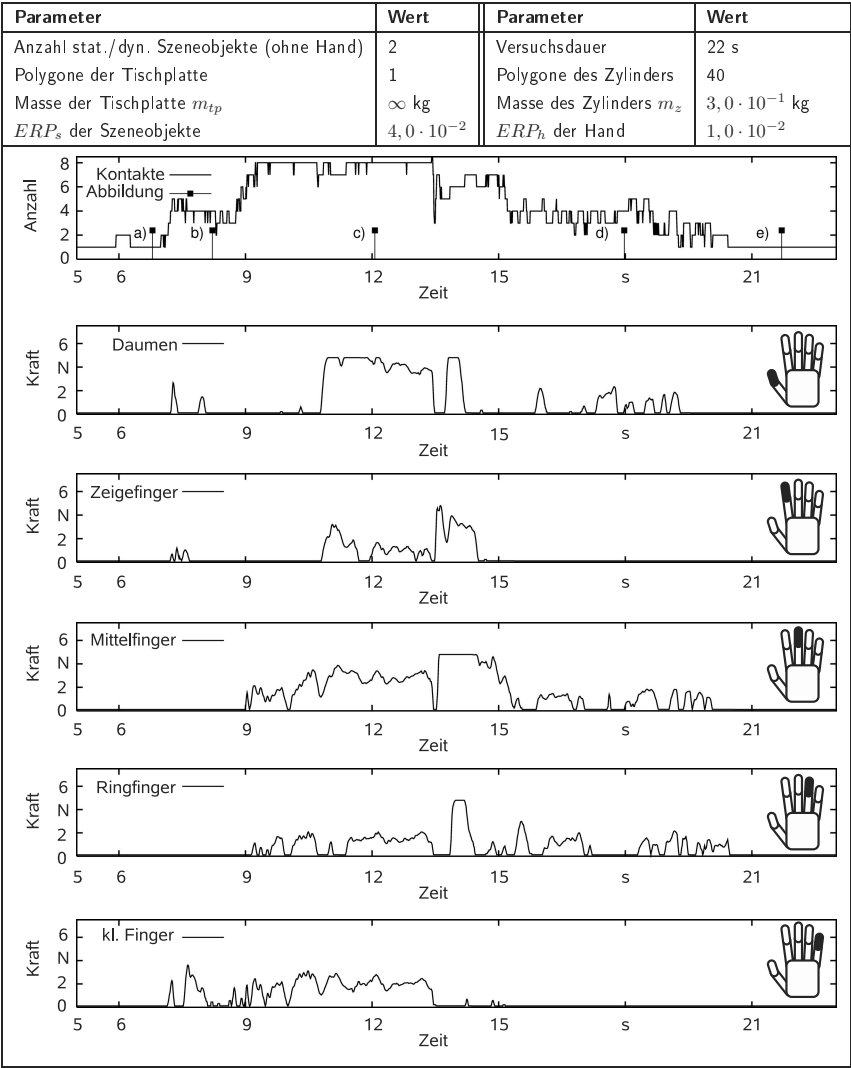


Abbildung 6.10: Zeitlicher Verlauf eines Kraftgriffs, in Kombination mit einem Präzisionsgriff zum gezielten Abstellen des Testobjekts am Beispiel eines Zylinders

die Fingerspitzen und die weiteren Fingerglieder fest an die Handinnenfläche gedrückt, wodurch eine hohe Stabilität des Griffs erreicht wird.

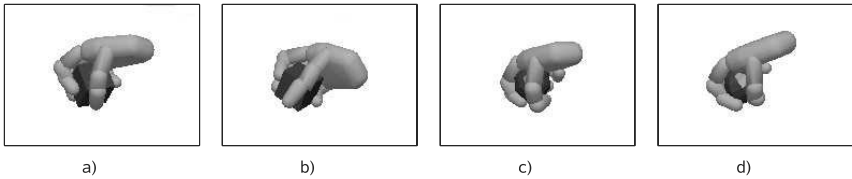


Abbildung 6.11: Ausführung von zirkularen Kraftgriffen anhand eines Würfels (a, b) und einer Kugel (c, d) als Testobjekte

### 6.2.4 Fügetests

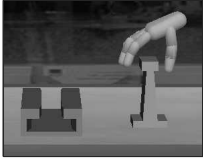
Neben den erfolgreich gezeigten Grundbewegungen nach MTM (siehe Abbildung 4.3) des Hinlangens, des sicheren Greifens, des Bringens und des Loslassens durch  $Ve^2$  stellt der zentrale und hier wichtigste Vorgang des Fügens einen weiteren erforderlichen Schritt bei einer manuellen Montage dar. Die Simulation des Fügevorgangs ist ein Kernbestandteil einer Montagesimulation und stellt hohe Anforderungen an die Simulation und das Interaktionskonzept. Aus Gründen der Echtzeitfähigkeit sind in  $Ve^2$  nur Fügeverfahren durch Zusammensetzen oder durch An- und Einpressen implementiert. Das grundlegende Konzept der implementierten Fügeoperationen in  $Ve^2$  basiert wie das Greifkonzept auf rein physikalischen Beziehungen: einerseits zwischen der virtuellen Hand als Benutzervatar und den manipulierten virtuellen Objekten und andererseits zwischen den virtuellen Objekten untereinander. Die Definition logischer Bedingungen für die Verbindungen entfallen. Der Zusammenhalt der gefügten Objekte in  $Ve^2$  wird nur durch deren Objektgeometrie und die entsprechend wirkenden Kontaktkräfte gewährleistet. Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Implementierung dieses Ansatzes wurden die im Folgenden beschriebenen Experimente zu form- und kraftschlüssigen Verbindungsarten durchgeführt.

#### Formschlüssige Steckverbindung

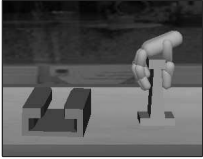
Als Erstes wurde die Durchführung einer formschlüssigen, wieder lösbaren Steckverbindung getestet. Es sollte gezeigt werden, dass in  $Ve^2$  eine formschlüssige Verbindung ohne die Definition logischer Bedingungen realisiert werden kann. Darüber hinaus sollte demonstriert werden, dass diese Verbindung belastbar ist und die miteinander verbundenen Körper zusammen manipuliert werden können, die Verbindung aber dennoch wieder lösbar

ist. Das Versuchsszenario bestand aus einer Tischplatte als statische Unterlage und zwei dynamischen Testobjekten, die jeweils das Innen- und das Außenteil einer formschlüssigen Steckverbindung darstellten. Die Szene umfasste insgesamt 205 Polygone. Davon bestand die statische Unterlage aus einem Polygon. Das Innenteil setzte sich aus 48 Polygonen und das Außenteil aus 156 Polygonen zusammen. Zur Durchführung des gesamten Experiments wurden 61 Sekunden benötigt. Die spezifischen Versuchsparameter und die Teilbilder a bis j des Versuchsablaufs sind in Abbildung 6.12 zusammengefasst.

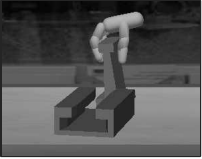
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Anzahl stat./dyn. Szeneobjekte	3	Versuchsdauer	61 s
Polygone der Tischplatte	1	Masse der Tischplatte $m_{tp}$	$\infty$ kg
Polygone des inneren Testobjekts	48	Masse des inneren Testobjekts $m_i$	$3,5 \cdot 10^{-1}$ kg
Polygone des äußeren Testobjekts	156	Masse des äußeren Testobjekts $m_a$	$3,0 \cdot 10^{-1}$ kg
$ERP_*$ der Szeneobjekte	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$ERP_h$ der Hand	$2,0 \cdot 10^{-2}$



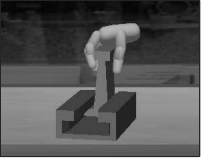
a)



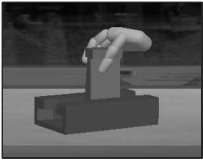
b)



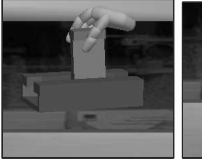
c)



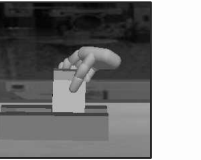
d)



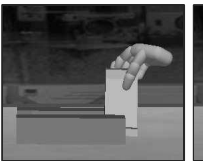
e)




f)



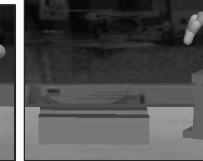
g)



h)



i)



j)

Abbildung 6.12: Physik-basiertes interaktives Fügen und Trennen einer formschlüssigen Steckverbindung in  $Ve^2$ , ohne logische Verbindungsregeln zu erfordern

Der Ablauf des Experiments begann mit den beiden Fügepartnern in der Ausgangslage (Teilbild a). Das Innenteil wurde durch die virtuelle Hand gegriffen (Teilbild b) und zur Fügestelle (Teilbild c) gebracht. Nach dem erfolgreichen Fügevorgang (Teilbild d) wurde

die Verbindung auf die rotatorische Belastbarkeit (Teilbild e) und durch das Anheben der beiden Körper auf Zug (Teilbild f) getestet. Nach diesem Test erfolgte das kontrollierte Absetzen der gefügten Objekte (Teilbild g) und deren Trennung (Teilbild h, i). Abschließend wurde das Innenteil in der Endlage losgelassen (Teilbild j).

Die Bildfolge des Fügeexperiments zeigt, dass eine belastbare Steckverbindung in  $Ve^2$  nur aufgrund physikalischer Abhängigkeiten hergestellt werden kann. Da keine logischen Verknüpfungen eingesetzt werden, ist diese Verbindung interaktiv in der virtuellen Umgebung wieder lösbar, ohne artifizielle Benutzereingriffe bzw. logische Befehle zu erfordern. Zudem zeigt das Experiment die gute Manipulierbarkeit der Testobjekte durch den Benutzervatar. Das gegriffene Innenteil kann während des gesamten Experiments kontrolliert und sicher mit der virtuellen Hand manipuliert werden. Ein zusätzlicher Handhabungsvorgang, bestehend aus Loslassen, Umgreifen und Neugreifen, ist nicht notwendig.

### Formschlüssige Drehverbindung

In Ergänzung zu einer linearen Steckverbindung, die nur eine translatorische Manipulation der Objekte erfordert, wurde auch eine Steckverbindung in  $Ve^2$  getestet, bei der die Fügepartner erst durch eine gegenseitige Verdrehung miteinander formschlüssig verbunden werden. Vergleichbar mit dem vorhergehenden Experiment sollte gezeigt werden, dass in  $Ve^2$  ohne vorabdefinierte logische Verbindungsregeln eine formschlüssige, wieder trennbare Verbindung zwischen zwei Fügepartnern hergestellt werden kann. Darüber hinaus sollte die erforderliche präzise Feinmanipulation des Innenteils durch das in  $Ve^2$  implementierte Interaktionskonzept demonstriert werden.

Das in Abbildung 6.13 gezeigte Versuchsszenario bestand aus einer statischen Unterlage und zwei dynamischen Testobjekten, die jeweils das Innenteil und das Außenteil der Verbindung darstellten. Die Szene bestand insgesamt aus 227 Polygonen, wovon die statische Unterlage ein Polygon, das Innenteil 92 Polygone und das Außenteil 135 Polygone umfasste. Die Versuchsdauer betrug 53 Sekunden. Die Parameter des Versuchs und die entsprechenden Teilbilder a bis h des Versuchsablaufs sind in Abbildung 6.13 ersichtlich. Im Gegensatz zu dem vorhergehend beschriebenen Experiment einer linearen Steckverbindung erfordert die Realisierung einer durch eine Drehbewegung gesicherten Steckverbindung ein wesentlich höheres Maß an Feinmanipulation. Der Ablauf dieses Experiments umfasste ausgehend von den auf der Arbeitsfläche angeordneten zwei Fügeteilen die folgenden Teilschritte (siehe die entsprechenden Teilbilder in Abbildung 6.13):

- a) Ausgangslage: Anordnung der beiden Füge Teile auf der Arbeitsfläche,
- b) das Greifen des Innenteils,

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Anzahl stat./dyn. Szeneobjekte	3	Versuchsdauer	53 s
Polygone der Tischplatte	1	Masse der Tischplatte $m_{tp}$	$\infty$ kg
Polygone des inneren Testobjekts	92	Masse des inneren Testobjekts $m_i$	$3,5 \cdot 10^{-1}$ kg
Polygone des äußeren Testobjekts	135	Masse des äußeren Testobjekts $m_a$	$3,5 \cdot 10^{-1}$ kg
$ERP_s$ der Szeneobjekte	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$ERP_h$ der Hand	$2,0 \cdot 10^{-2}$

Abbildung 6.13: Physik-basiertes interaktives Fügen, Testen und Trennen einer form-schlüssigen Drehverbindung in  $Ve^2$

- c) das Bringen des Innenteils zur Fügestelle und die Orientierung (Rotation um  $90^\circ$ ) des Fügepartners gemäß der Geometrie der Fügestelle des Außenteils,
- d) das Fügen und Sichern der Verbindung durch eine  $90^\circ$ -Drehung des Innenteils,
- e) das Testen der Fügeverbindung auf Zugbelastung durch Anheben der gefügten Testobjekte im Verbund,
- f) das Absetzen der Körper,
- g) das Lösen der Verbindung und
- h) das Loslassen des gegriffenen Innenteils.

Durch den erfolgreichen Verlauf des Versuchs kann gezeigt werden, dass in  $Ve^2$  nicht nur belastbare lineare Steckverbindungen ausgeführt werden können, sondern auch belastba-

re Verbindungen durch drehbare Sicherungsmechanismen möglich sind. Da diese Verbindungsart ebenfalls rein auf physikalischen Prinzipien beruht, ist auch diese Verbindung interaktiv in der virtuellen Umgebung ohne zusätzliche artifizielle Benutzerbefehle wieder lösbar. Entsprechend der Durchführung einer vergleichbaren Aufgabe in einer realen Montageumgebung kann das gegriffene Objekt gegriffen, fixiert und für die erforderlichen Drehbewegungen gezielt feinmanipuliert werden. Zusätzliche Handhabungsschritte wie Loslassen, Umgreifen und Neugreifen, die durch eine ungenügende Benutzerinteraktion erforderlich würden, sind für die Verbindung, wie auch schon für die Steckverbindung, in  $Ve^2$  nicht notwendig.

### **Kraftschlüssige Steckverbindung**

Neben den Steckverbindungen durch Formschluss, die rein aufgrund der Geometrien der Fügepartner zusammengehalten werden und wieder trennbar sind, besteht in  $Ve^2$  auch die Möglichkeit, kraftschlüssige, nicht trennbare Verbindungen zu realisieren. Mit dem durchgeführten Experiment sollte der Ablauf zum Fügen einer derartigen kraftschlüssigen Verbindung gezeigt werden. Die in diesem Experiment interaktiv erzeugte Verbindung ist belastbar, kann allerdings von dem Benutzer mit einer Hand nicht definiert wieder getrennt werden. Das Versuchsszenario war, vergleichbar mit den beschriebenen Experimenten zur Erstellung formschlüssiger Verbindungen, aus einer statischen Unterlage und zwei dynamischen Testobjekten aufgebaut. Die Testobjekte stellten wie in den vorhergegangenen Fügetests jeweils das Innen- und das Außenteil der Verbindung dar. Die für den Füge- und Testvorgang erforderliche Versuchszeit betrug 63 Sekunden. Die definierten Parameter und die Polygonanzahl der Testobjekte sind aus Abbildung 6.14 ebenso ersichtlich wie die Bildfolge von a bis g des vollständigen Versuchsablaufs.

Für die bisher gezeigten formschlüssigen Steckverbindungen (Abbildung 6.12 und 6.13) ist vor allem die Fähigkeit zur Feinmanipulation der Testobjekte mit der virtuellen Hand wichtig, da nur so die Fügepartner präzise zusammengesetzt werden können. Im Gegensatz dazu erfordern kraftschlüssige Verbindungen die Anwendung eines stabilen Kraftgriffs, um die dem Fügevorgang entgegenwirkenden Kräfte aufbringen zu können. Der in Abbildung 6.14 bzw. den entsprechenden Teilbildern gezeigte Ablauf umfasst die folgenden Schritte:

- a) Ausgangslage: Anordnung der beiden Fügepartner auf der Arbeitsfläche,
- b) das Greifen des Innenteils,
- c) das Bringen des Innenteils zur Fügestelle,
- d) das Verbinden des Innenteils mit dem Außenteil unter Druck,

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Anzahl stat./dyn. Szeneobjekte	3	Versuchsdauer	63 s
Polygone der Tischplatte	1	Masse der Tischplatte $m_{tp}$	$\infty$ kg
Polygone des inneren Testobjekts	160	Masse des inneren Testobjekts $m_i$	$3,0 \cdot 10^{-1}$ kg
Polygone des äußeren Testobjekts	120	Masse des äußeren Testobjekts $m_a$	$3,0 \cdot 10^{-1}$ kg
$ERP_s$ der Szeneobjekte	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$ERP_h$ der Hand	$2,0 \cdot 10^{-2}$


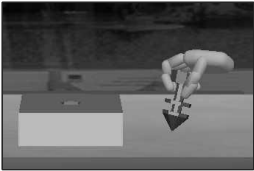

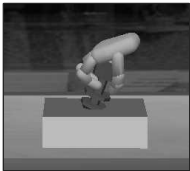
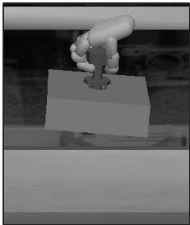
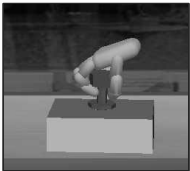









Abbildung 6.14: Interaktives Fügen einer kraftschlüssigen nicht lösbaren Steckverbindung

- e) das Testen der Fügeverbindung auf Zugbelastung durch Anheben der gefügten Testobjekte,
- f) das Absetzen der Körper und
- g) das Loslassen des gegriffenen Innenteils.

Durch das Versuchsergebnis wird gezeigt, dass in  $Ve^2$  auch kraftschlüssige, nicht lösbare Verbindungen zwischen zwei Körpern, ohne vorab logische Beziehungen definieren zu müssen, hergestellt werden können. Da  $Ve^2$  derzeit noch nicht für die Berechnung flexibler Körper ausgelegt ist, können kraftschlüssige Verbindungen jedoch nur qualitativ nachgebildet werden (siehe Abbildung 6.15). Das hier verwendete Konzept beruht darauf, dass die Fügekräfte, die von der virtuellen Hand aufgebracht werden, während des Fügevorgangs die Widerstandskräfte, die durch die Objektüberschneidungen auftreten, überwinden können. Zudem kann während des Fügevorgangs der Fügepartner B nicht verrutschen, da dieser fest gegen die statische Unterlage gepresst wird. Werden die gefügten Körper A und B nun durch die virtuelle Hand angehoben, sind die auf den Körper B



wirkenden sichernden Widerstandskräfte höher als dessen Gewichtskraft. Die Verbindung ist somit belastbar und nicht mehr lösbar.

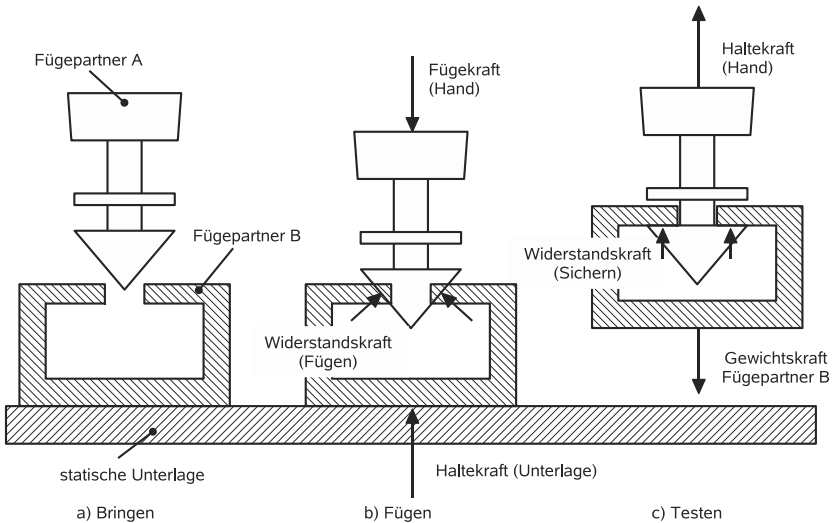


Abbildung 6.15: Schematischer Vorgang beim Fügen nicht lösbarer Verbindungen

### 6.2.5 Montagebeispiel

In Ergänzung zu den einzelnen Greifexperimenten soll anhand eines komplexeren Beispiels ein einfacher Montageablauf mit drei Montageschritten gezeigt werden. Drei längliche Testobjekte mit unterschiedlichen Querschnitten werden dabei in vordefinierte Aussparungen einer Platte mit Griff eingelegt. Durch dieses Experiment wurde einerseits ein einfaches Montageszenario mit mehreren Montageschritten durchgeführt und andererseits die Grenze der Leistungsfähigkeit der beschriebenen Implementierung von Ve<sup>2</sup> hinsichtlich der Performanz untersucht.

Die Versuchsparameter und die Bildfolge a bis l des Versuchsablaufs sind in Abbildung 6.16 ersichtlich. Das Versuchsszenario bestand aus einem virtuellen manuellen Arbeitsplatz mit einer statischen Tischplatte. Die übrigen Teile des Tisches mit Ablage und Beleuchtung dienten nur zu Visualisierungszwecken und waren weder in der Kollisionserkennung noch in der Physiksimulation mit berücksichtigt. Der für den Benutzer manipulierbare Anteil der Szene bestand aus vier dynamischen Testobjekten, deren Geometriedaten insgesamt

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Anzahl stat./dyn. Szeneobjekte	5	Versuchsdauer	190 s
Polygone der Tischplatte	1	Masse der Tischplatte $m_{tp}$	$\infty$ kg
Polygone der Einlegeplatte	177	Masse der Einlegeplatte $m_{ep}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$ kg
Polygone des Zylinders	40	Masse des Zylinders $m_z$	$2,5 \cdot 10^{-1}$ kg
Polygone des Kreuzstabs	52	Masse des Kreuzstabs $m_k$	$2,5 \cdot 10^{-1}$ kg
Polygone des Vierkantstabs	12	Masse des Vierkantstabs $m_v$	$2,5 \cdot 10^{-1}$ kg
$ERP_s$ der Szeneobjekte	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$ERP_h$ der Hand	$3,0 \cdot 10^{-2}$

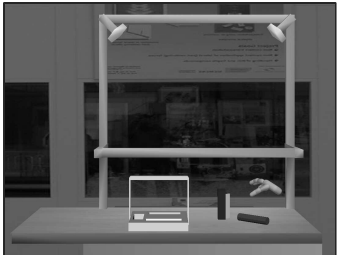

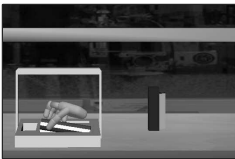
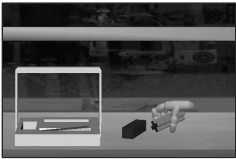
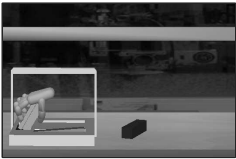
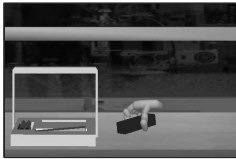


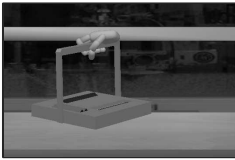
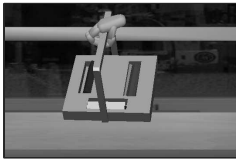
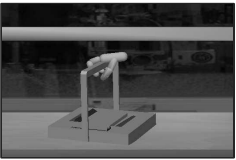
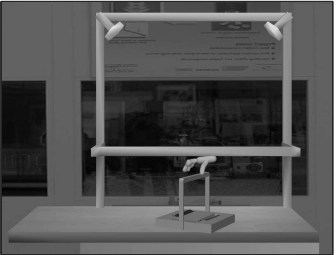













Abbildung 6.16: Einfaches Einlegebeispiel mit insgesamt vier dynamischen Objekten

281 Polygone umfasste. Die Testobjekte waren eine Platte mit Griff und Aussparungen in Form der Testobjekte, ein zylindrischer Stab, ein Stab mit einem Kreuzprofil und ein Vierkantstab. Das während der Versuchsdurchführung gemessene Systemverhalten ist in Bezug auf die Systemperformanz, die aufgetretenen Kontakte und hinsichtlich der gemessenen Fingerkräfte in der Abbildung 6.17 veranschaulicht.

Der Ablauf des Experiments entsprach pro Teststab dem vollständigen Aktionszyklus nach MTM (Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen, Loslassen) für eine IMS aus Abbildung 4.3. Dieser Aktionszyklus wurde in den Testabschnitten b bis g durchgeführt. In den weiteren Testabschnitten h bis l wurde die Platte mit den eingefügten Teststäben beispielhaft für einen Transportvorgang angehoben, definiert gekippt und kontrolliert wieder auf der Arbeitsplatte abgesetzt. Während dieses Vorgangs verblieben die eingefügten Testobjekte fest fixiert in der Einlegeplatte.

Das Ergebnis des Experiments zeigt, dass mit einem statischen und vier dynamischen Objekten mit insgesamt 282 Polygonen noch eine kontrollierte Manipulation der jeweiligen einzelnen Testobjekte und der komplett montierten Baugruppe als Ganzes möglich ist. Vorabdefinierte logische Objektverbindungen und/oder Abhängigkeiten sind für die interaktive Echtzeitsimulation dieses Montageszenarios nicht erforderlich.

Der gesamte Montagevorgang der drei Teststäbe benötigte ca. 117 Sekunden. Die zusammengefassten Testabschnitte des Hinlangens, Greifens und Bringens einerseits und der Vorgang des Fügens andererseits dauerten wie anhand der Kraftprofile erkenntlich pro Testobjekt ungefähr 20 Sekunden. Dies entspricht einem Vielfachen der Zeit, die voraussichtlich für vergleichbare reale Einlegevorgänge erforderlich wäre. Dadurch wird die Grenze der Performanz von  $Ve^2$  in der aktuellen Implementierung und der verwendeten Rechnerhardware aufgezeigt. Aufgrund der wenigen dynamischen Objekte lag die Geschwindigkeit des *VeKernel*-Prozesses, wie in Abbildung 6.17 gezeigt, für das haptische Rendering und für die Objektsynchronisierung kontinuierlich über 4 kHz. Allerdings sank die Aktualisierungsrate des *VeCollision*- und des *VeSimulation*-Prozesses aufgrund der bis zu 16 gleichzeitig auftretenden Kontakte und der Vielzahl der Kollisionen an Stellen konkaver Objektgeometrien auf ca. 400 Hz ab. Dies führte unter Berücksichtigung der eingestellten Simulationsschrittweite  $h$  von  $1,5 \cdot 10^{-3}$  Sekunden zu einem spürbar langsameren Simulationsablauf und damit zu einer reduzierten Objektdynamik. Bei einer Aktualisierungsrate von 400 Hz kann dieser Effekt jedoch durch etwas verlangsamte Bewegungen des Benutzers kompensiert werden. Allerdings bedeutet dies längere Montagezeiten. Sinkt die Berechnungsgeschwindigkeit der Physiksimulation weiter ab, sind auch die in der realen Welt relativ langsam ausgeführten Bewegungen des Benutzers schneller als die entsprechenden berechneten Objektbewegungen in  $Ve^2$ . Instabilitäten in der Physiksimulation, die auch die Qualität des haptischen Renderings beeinträchtigen, sind somit die Folge. Die

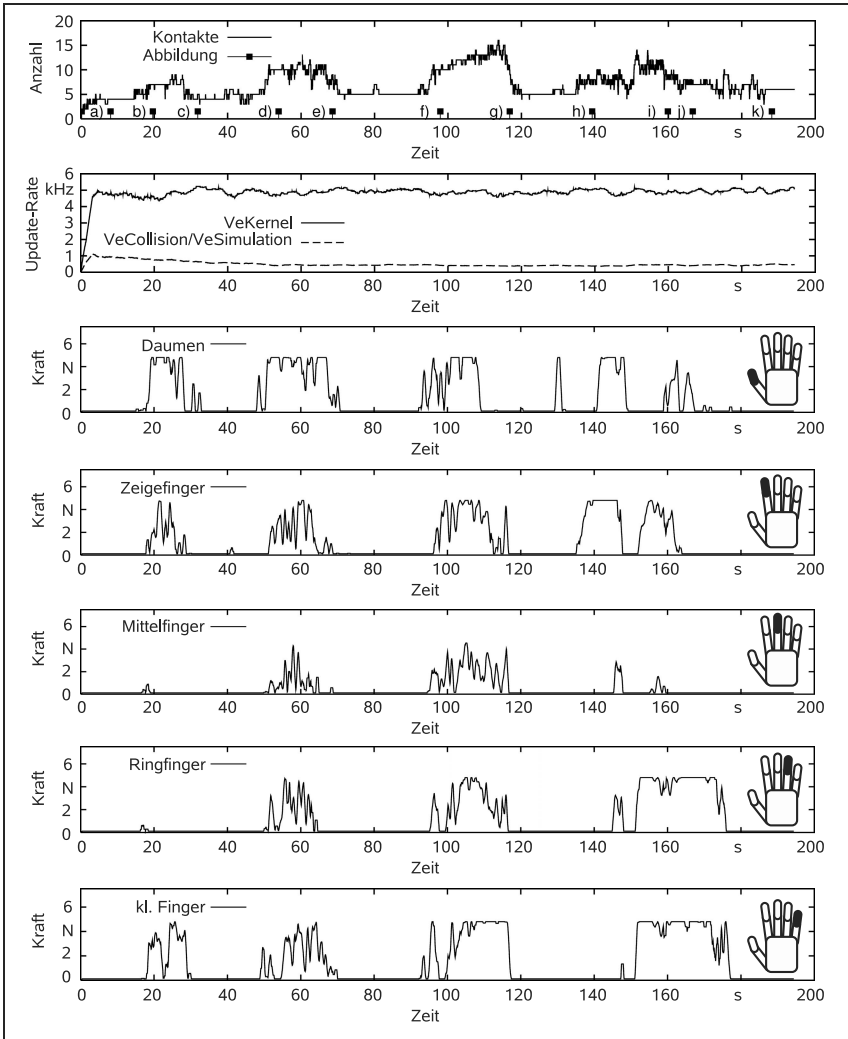


Abbildung 6.17: Erfasste Messwerte bezüglich der Anzahl der auftretenden Kontakte und der Ausführungsgeschwindigkeit der zwei Hauptprozesse sowie der auftretenden Fingerkräfte von Daumen, Zeigefinger, Mittelfinger, Ringfinger und kleinem Finger während der Objektmanipulation im Rahmen eines einfachen Einlegebeispiels mit insgesamt vier dynamischen Objekten

Wahl einer größeren Simulationsschrittweite kann diesem Effekt nicht entgegenwirken, da die Berechnungsgenauigkeit des verwendeten Euler-Integrators erster Ordnung (vgl. Abschnitt 4.4.5) maßgeblich von der Schrittweite abhängt. So hätte eine Vergrößerung der Schrittweite zwar eine verbesserte Objektdynamik, aber auch durch die steigende Berechnungsgenauigkeit eine generell höhere Instabilität der Physiksimulation zur Folge. Diese beeinträchtigt wiederum die Qualität des haptischen Renderings deutlich.

Eine wichtige zusätzliche Erkenntnis dieses Experiments ist die Bedeutung des Interaktionskonzepts von  $Ve^2$ , das alle fünf Finger unterstützt. Die an den Benutzer zurückgekoppelten Fingerkräfte machen den variablen Einsatz der unterschiedlichen Finger je nach gegriffenem Objekt und Situation offensichtlich. Dies wird anhand der Kraftverläufe in Abbildung 6.17 verdeutlicht. Besonders hervorzuheben sind die zurückgekoppelten Kräfte des Ringfingers und des kleinen Fingers. Diese zeigen, dass alle Finger für eine flexible Objektmanipulation bedeutsam sind. Eine Vereinfachung des Handmodells auf den Daumen, den Zeigefinger und den Mittelfinger würde voraussichtlich zu einem wesentlich instabileren Greifverhalten und damit zu merklichen Einschränkungen bei der Objektmanipulation führen.

## 6.3 Technische und wirtschaftliche Betrachtung

### 6.3.1 Allgemeines

Der Einsatz einer IMS bietet ein großes Nutzenpotential, dem allerdings auch Einschränkungen entgegenstehen. Den größten Nutzen von VR-Systemen sehen Anwender nach KLOCKE & STRAUBE (2004) in der Zeitreduktion der Entwicklungs- und Planungsprozesse, dargestellt in Abbildung 6.18. Zudem müssen bei der Bewertung der IMS für den praktischen Einsatz auch weiche Faktoren mit einbezogen werden. Diese sind zwar u. U. für den erfolgreichen Einsatz maßgeblich mitbestimmend, aber monetär schwer zu erfassen. Ein wichtiger Faktor dieser Art ist beispielsweise die Mitarbeiterzufriedenheit bei der praktischen Anwendung von VR-Systemen. So ist beispielsweise nicht zu unterschätzen, dass Mitarbeiter durch den Gebrauch von als „exotisch“ empfundenen VR-Geräten wie Stereobrillen oder Interaktionshandschuhen sich nicht der Lächerlichkeit preisgeben wollen und schon allein aus diesem Grund den Einsatz von VR ablehnen oder so weit wie möglich reduzieren. Damit wird VR zum reinen Management-Präsentationsmedium – ohne Ausschöpfung des eigentlich nutzbringenden Potenzials für eine kontinuierliche Unterstützung kooperativer Entwicklungs- und Produktionsplanungsprozesse.

Zur Beurteilung des praktischen Nutzenpotentials von  $Ve^2$  werden im Folgenden eine kritisch-technische und eine kritisch-wirtschaftliche Betrachtung vorgenommen.

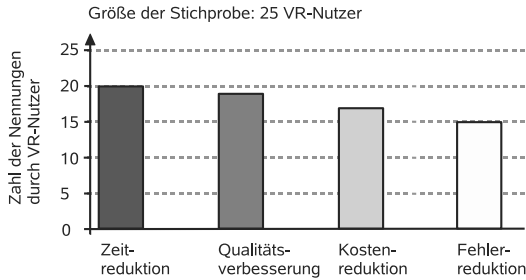


Abbildung 6.18: Vorteile für Benutzer, die durch den Einsatz von VR gesehen werden. Das Ergebnis basiert auf der Befragung von 25 Anwendern durch KLOCKE & STRAUBE (2004)

### 6.3.2 Technische Betrachtung

Zur Beurteilung der IMS aus technischer Sicht sind die Faktoren Rechnertechnik, verfügbare Peripheriegeräte, verfügbare Interaktionsgeräte, verfügbare Softwarewerkzeuge und die dadurch erreichbare Qualität der Simulation und des haptischen Renderings zu berücksichtigen.

#### Bewertung und Potenzial der verfügbaren Rechnerhardware

Aktuell reicht die verfügbare Rechnerleistung aus, um die Möglichkeiten und Potenziale der Technologie aufzuzeigen. Die im Rahmen der Versuche dieser Arbeit verwendeten 3-D-Modelle entsprechen jedoch hinsichtlich der Polygonzahl nicht den 3-D-Modellen, die für den industriellen praktischen Einsatz dieser Technologie erforderlich wären. Durch die in den Experimenten gezeigten Testszenarien mit knapp 300 Polygonen und maximal vier dynamischen Objekten ist die Nachbildung eines realen Montagearbeitsplatzes und der damit verbundenen manuellen Tätigkeiten noch nicht möglich. Allerdings sind technologische Entwicklungstrends zu beachten, die mittelfristig die verfügbare Rechnerleistung enorm erhöhen und somit auch die Basis für eine praktische Anwendung einer haptischen Physik-basierten IMS bilden könnten. So ist erstens auf die rapide Entwicklung von Mehrprozessor-PCs bzw. von Multicore-Prozessoren zu verweisen. Dies bedeutet neben dem Geschwindigkeitszuwachs der Prozessoren selbst nochmals eine Multiplikation der verfügbaren Rechenleistung. So sind inzwischen PCs mit bis zu vier Prozessor-Kernen und bei Konsolen sogar Rechereinheiten mit bis zu sieben Prozessor-Kernen verfügbar. Der zweite Trend, der zu einer Multiplikation der Berechnungsgeschwindigkeit führen könnte,

ist die Entwicklung von Physik-Simulations-Karten (AGEIA 2007), die hoch-effizient sind und ausschließlich die Kollisionserkennung und die Physiksimulation durchführen – vergleichbar mit Grafikkarten. Drittens können moderne Grafikkarten selbst über die Grafikdarstellung hinaus zusätzliche Berechnungsprozesse übernehmen, die den Hauptprozessor entlasten und somit zu einer insgesamt höheren Systemperformanz beitragen.

Bei der aktuell anhaltenden Entwicklungsgeschwindigkeit ist in ca. 3 bis 5 Jahren mit einer ausreichend performanten Rechnerhardware für den praktischen Einsatz der IMS zu rechnen.

### **Bewertung der verfügbaren Ausgabegeräte**

Zur Visualisierung der virtuellen Szene stehen hochwertige kommerzielle Ausgabegeräte zur Verfügung. Mittels LCD-Beamern sind großflächige, lichtstarke und augenschonende Visualisierungen auch in Stereo mit zirkular oder linear polarisiertem Licht möglich. Eine stereoskopische Visualisierung mit LCD-Beamern wurde erfolgreich bei den Versuchen mit Ve<sup>2</sup> verwendet und wird von Ingenieuren auch in der Praxis jetzt schon eingesetzt.

Hinsichtlich der kommerziell verfügbaren kraftrückkoppelnden Handschuhe ist ein großes Defizit festzustellen. Eine große Einschränkung stellt, wie sich in den Versuchen mit Ve<sup>2</sup> gezeigt hat, die fehlende Alltagsauglichkeit des eingesetzten CyberGrasp<sup>TM</sup> dar. Die Übertragungsmechanik ist nur mit großem Zeitaufwand am Körper anzulegen und das subjektiv empfundene Übertragungsverhalten ist sehr weich. Zudem ist die Mechanik technisch sehr anfällig und wartungsintensiv. Die Feinmanipulation virtueller Objekte kann aufgrund der Übertragungsmechanik haptisch nur grob angenähert abgebildet werden. Die Kraftübertragung ist nur über die Fingerspitzen möglich, obwohl bei Kraftgriffen ein wesentlicher Teil des Kraftflusses zwischen der menschlichen Hand und dem manipulierten Objekt über die Handfläche realisiert wird. Die Entwicklungsgeschwindigkeit in diesem Bereich hat sich in den letzten Jahren verringert.

Aus heutiger Sicht sind keine richtungsweisenden kommerziellen Neuentwicklungen für kraftrückkoppelnde Handschuhe in den nächsten Jahren zu erwarten. Der kurz- bis mittelfristige praktische Einsatz für die IMS ist somit nur unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen möglich.

### **Bewertung der verfügbaren Eingabegeräte**

Hinsichtlich der erforderlichen Trackingsysteme sind keine Einschränkungen zur Anwendung der IMS zu erwarten. Die für Ve<sup>2</sup> erfolgreich eingesetzte optische Trackingtechnologie setzt sich auf dem Markt aufgrund der geringen Störanfälligkeit und der leichten

Handhabbarkeit zunehmend durch. Dem Anwender stehen für die IMS somit ausgereifte kommerzielle Systeme mit der geforderten Genauigkeit und Erfassungsgeschwindigkeit zur Verfügung.

### **Bewertung der verfügbaren Softwareperipherie**

Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von 3-D-CAD-Werkzeugen und 3-D-Modellierungsprogrammen stehen dem Benutzer heute schon vielfältige Möglichkeiten für die datentechnische Integration von VR in die eigene Infrastruktur der Entwicklungswerkzeuge zur Verfügung. Die Einschränkung auf Polygon-basierte Datenformate für die Echtzeitdarstellung in  $Ve^2$  verhindert jedoch zum heutigen Zeitpunkt nach wie vor einen bidirektionalen Datenaustausch mit 3-D-CAD-Programmen. Dies bedeutet jedoch in der praktischen Anwendung keine Einschränkung, da ausschließlich die Objektinteraktion und -manipulation während der Durchführung der Simulation von Bedeutung sind. Geometrische Veränderungen an den Objekten werden in  $Ve^2$  während einer IMS nicht durchgeführt. Die spätere Synchronisation der VR-Daten mit dem 3-D-CAD-Datenstamm ist dadurch nicht erforderlich.

### **Bewertung der erreichten Qualität der Echtzeit-Physiksimulation**

Der Realitätsgrad der Physiksimulation wird im Falle frei beweglicher Objekte ohne Kontakte als ausreichend eingestuft. Kleine sichtbare Abweichungen des berechneten Objektverhaltens von dem realen Objektverhalten sind bei ruhenden Objekten zu beobachten. Die durch den echtzeitfähigen Euler-Integrator erster Ordnung auftretenden numerischen Ungenauigkeiten führen bei der Kontaktberechnung von ebenen, flächig aufliegenden virtuellen Körpern zu minimalen translatorischen oder rotatorischen gleitenden Objektverschiebungen. Diese verursachen ohne Einwirkung durch den Benutzer über einen längeren Simulationszeitraum hinweg kleine sichtbare Veränderungen der Position und Orientierung der virtuellen Objekte. Zudem ist für den praktischen Einsatz die Stabilität der in  $Ve^2$  implementierten Simulation noch nicht ausreichend. Treten aufgrund der Objektmanipulation durch den Benutzer zu große Objektüberschneidungen auf, so kann dies zu einem unvorhersehbaren Objektverhalten führen. Im Einzelfall kann dies bedeuten, dass der Montageversuch abgebrochen und neu durchgeführt werden muss.

### **Bewertung der Qualität des haptischen Renderings und der Objektmanipulation**

Die erreichte subjektive Qualität des haptischen Renderings ist für die Unterstützung einer gezielten Manipulation der virtuellen Objekte geeignet. So wird ein definiertes, für den



Benutzer eindeutig interpretierbares Kraftsignal bei allen durchgeführten Experimenten an die fünf Finger zurückgekoppelt. Besonders ist die Bedeutung des Ringfingers und des kleinen Fingers hervorzuheben, die einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zu einer stabilen, sicheren Manipulation leisten.

Die Manipulation ist dabei für alle Objekte möglich, die auch in der realen Montage mit einer Hand gegriffen werden können. Für sperrige Objekte bzw. für einen Werkzeugeinsatz in der IMS wäre eine beidhändige Interaktion erforderlich. Die Erweiterung des Hardwareaufbaus um einen weiteren kraftrückkoppelnden Handschuh würde dies leicht ermöglichen. Durch das Interaktionsprinzip des Physik-basierten VC ist die Anzahl der Benutzeravatare nur durch die verfügbaren Eingabegeräte und die Performanz der Rechnerhardware beschränkt.

Für die Handhabung sehr kleiner Objekte ist das bisher implementierte haptische Rendering jedoch nur bedingt geeignet. Es besteht die Gefahr einer vollständigen Durchdringung der Objekte durch den Benutzeravatar, bevor eine ausreichende Kraft an den Benutzer zurückgekoppelt wird. Ein unvorhersehbares Objektverhalten bzw. ein instabiles Kraftsignal ist die Folge.

### **Zusammenfassung der technischen Bewertung**

Zusammenfassend wäre ein mittelfristiger praktischer Einsatz der IMS technisch möglich. Wird der nach wie vor rasche Zuwachs an Berechnungsgeschwindigkeit der verfügbaren PCs in Betracht gezogen, so werden in Zukunft die Handhabung und die physikalische Simulation von komplexen virtuellen Szenen mit vielen Objekten in Echtzeit keine Hürden darstellen.

Eine Einschränkung stellen jedoch die verfügbaren kraftrückkoppelnden Handschuhe dar. Da diese ein zentrales Element einer Physik-basierten IMS mit haptischer Rückkopplung sind, wird sich die Technologie voraussichtlich erst in der praktischen Anwendung durchsetzen, wenn adäquate technische Lösungen zur Verfügung stehen.

### **6.3.3 Wirtschaftliche Betrachtung**

Neben der Machbarkeit und der Verfügbarkeit der Technologie zur Durchführung einer Physik-basierten IMS mit haptischen Interaktionsgeräten wird das Verhältnis zwischen dem entstehenden finanziellen Aufwand und dem Nutzen über den praktischen Einsatz entscheiden.

### **Betrachtung der Kostenvorteile**

In der heutigen Produktentwicklung und Produktionsplanung kommt eine Vielzahl von unterschiedlichen Rechnerwerkzeugen zum Einsatz. Ob die im Folgenden genannten Vorteile einer IMS sich tatsächlich als monetär quantifizierbare Kostenvorteile für das Unternehmen auswirken, hängt maßgeblich von der Integrationsfähigkeit der vorhandenen technischen Infrastruktur und den vorherrschenden Arbeitsabläufen und deren Flexibilität ab. Potentielle Kostenvorteile, die sich indirekt oder direkt für die Produktentwicklung im Zusammenspiel mit der Produktionsplanung ergeben, sind:

- eine Reduktion der Abstimmungsprozesse durch unmittelbare gemeinschaftliche Entscheidungen,
- eine Reduktion des Kommunikationsaufwands durch die Unterstützung eines intuitiven und kooperativen Arbeitsprozesses,
- eine Reduktion des Entwicklungsrisikos durch eine schnelle und unmittelbare Absicherung der Entwicklungs- und Planungsergebnisse,
- eine Reduktion des Analyseaufwandes digitaler Prototypen durch eine beschleunigte Simulationsvorbereitung, -durchführung und -auswertung,
- eine Reduktion der Personal- und Schulungskosten, da die Systembedienung nicht nur durch teure Simulationsexperten erfolgen muss,
- eine Reduktion der realen Hardwareprototypen und Montageteststände.

Durch den verstärkten Einsatz frühzeitiger Analysen ist eine Weitergabe der Kostenvorteile aus der Entwicklungs- und Planungsphase in die Phasen der Umsetzung des Produktionsanlaufs und des Produktionsbetriebs zu erwarten. Die potentiellen indirekten und direkten Kostenvorteile setzen sich dabei aus den folgenden Punkten zusammen:

- eine Verkürzung des Produktionsanlaufs durch eine bessere digitale Absicherung der Planungsergebnisse,
- eine Steigerung des Wirkungsgrades der Montage durch die frühzeitige Analyse des manuellen Montageablaufs und der dadurch möglichen frühzeitigen Reduktion nicht wertschöpfender Sekundärmontagevorgänge,
- eine verbesserte ergonomische Absicherung der Arbeitsplätze und die daraus folgende Reduktion von Ausfallzeiten bei Mitarbeitern in der manuellen Produktion,

- die Steigerung der Produktqualität und eine Reduktion der Nacharbeit durch eine verbesserte digitale Absicherung.

Der erreichbare Kostenvorteil einer digitalen Absicherung der Produktentwicklung im engen Zusammenspiel mit der Produktionsplanung mittels einer IMS kann sich bis hin zum Ende eines Produktlebenszykluses auswirken. So ist eine Absicherung der leichten und kostengünstigen Demontage eines Produkts durch die IMS schon während der Entwicklung möglich. Hinsichtlich einer sich ständig verschärfenden Umweltgesetzgebung könnte dieser Aspekt in Zukunft eine besondere Bedeutung bei der Kostenkalkulation eines Produktes einnehmen.

### **Betrachtung der finanziellen Aufwände**

Den potentiellen Kostenvorteilen stehen je nach Unternehmenssituation erhebliche finanzielle Aufwände hinsichtlich Investitionen, Anpassung der Softwareinfrastruktur, Anpassung der Unternehmensprozesse und Unterhaltskosten gegenüber. Diese Aufwände können die Kostenvorteile ggf. vollständig aufheben oder sogar übertreffen.

In eine wirtschaftliche Betrachtung des Einsatzes der IMS im Unternehmen sollten folgende Kostenfaktoren mit eingebogen werden: Die Kosten bei der Einführung eines Systems zur Durchführung einer IMS setzen sich zusammen aus den direkt anfallenden Investitionskosten für die Software- und Hardwarekomponenten der Anlage und den einmaligen Installationskosten. Zudem werden anfänglich die Kosten für die entsprechende Schulung und Einarbeitung der Mitarbeiter in eine wirtschaftliche Betrachtung mit einbezogen werden müssen. Um die Vorteile voll ausschöpfen zu können, sind je nach Unternehmenssituation entsprechend weitere Kosten mit der Einführung eines IMS-Systems verbunden. Diese können u. U. die direkten Investitionskosten sogar übersteigen. Sie umfassen einerseits technische Punkte wie:

- die weiteren Investitionen in die Softwareinfrastruktur wie 3-D-CAD, 3-D-Datenverwaltung, 3-D-Konvertierungsprogramme, 3-D-Modellierungssoftware
- und die anfänglichen Portierungskosten von 2-D- in 3-D-Modelle bzw. die Konvertierung der 3-D-Modelle in IMS-kompatible Formate.

Andererseits sind ggf. Investitionen in eine Veränderung der Unternehmensprozesse sowie der Entwicklungs- und Planungsabläufe erforderlich, um die IMS auch organisatorisch nahtlos in die Unternehmensprozesse einbinden zu können. Dies vermeidet systeminterne Probleme hinsichtlich des Datenaustauschs und der Mitarbeiterkommunikation und steigert die Akzeptanz der IMS und damit auch das Einsatzpotential.

Neben anfänglichen Kosten sind noch die laufend anfallenden Kosten eines IMS-Systems zu berücksichtigen. Diese setzen sich aus den folgenden Punkten zusammen:

- Kosten zur entwicklungsbegleitenden Modellaufbereitung,
- Betriebskosten der Anlage durch den Energie- und Platzverbrauch,
- Wartungskosten und
- Personal- und Schulungskosten zur Bedienung des Systems.

### **Zusammenfassung der wirtschaftlichen Betrachtung**

Werden die potentiellen Kostenvorteile zusammengefasst, so spielt für den wirtschaftlichen Einsatz einer IMS die erreichbare Verbesserung der Kommunikation zwischen den Mitarbeitern eine wesentliche Rolle. Dies setzt jedoch als Basis eine integrierte, datentechnisch durchgängige Systemlandschaft und darauf abgestimmte Unternehmensprozesse voraus. Mit der fortschreitenden gesamtheitlichen Einführung der Digitalen Fabrik und der Virtuellen Produktion (RUDOLF 2006, SCHACK 2007) in die firmenspezifischen Entwicklungsprozesse wird damit einerseits eine wichtige Grundlage für die IMS geschaffen, andererseits ist in diesem Zusammenhang die prinzipielle Verbesserung der Interaktion mit digitalen räumlichen Modellen stets als positiv und auch wirtschaftlich gewinnbringend einzustufen. Aus dieser übergeordneten Perspektive bietet die IMS viele Ansatzpunkte für potentielle Kostenvorteile. So entscheiden letztendlich allein die technische Ausgestaltung und die datentechnische Anbindung über den tatsächlichen Zugewinn, den Mitarbeiter durch den Einsatz dieser Technologie für das Unternehmen generieren können. Unter diesem Gesichtspunkt werden sich aus heutiger Sicht Anschaffung und Einführung eines haptischen Simulationssystems zur manuellen Montagesimulation kaum lohnen. Die Einschränkungen heutiger kraftrückkoppelnder Handschuhe spielen dabei eine wichtige Rolle. Ob eine derartige Investition in Zukunft rentabel sein wird, ist mit der Lösung dieses Problems eng gekoppelt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das heutige marktwirtschaftliche Umfeld für produzierende Unternehmen ist durch eine hohe Dynamik und einen hohen Konkurrenzdruck gekennzeichnet. Dies erfordert ein hohes Maß an Flexibilität und Reaktionsfähigkeit. Für die Produktion bedeutet dies auch kleine bis mittlere Losgrößen kosteneffizient zu handhaben. Der Montage und im Besonderen der manuellen Montage kommt dabei eine wichtige Bedeutung zu. Dementsprechend sind für einen schnellen Produktionsanlauf und für den reibungslosen Produktionsbetrieb eine detaillierte Planung und die simulative Absicherung manueller Montageprozesse wichtige Faktoren in der Produktionsplanung.

Eine der zentralen Herausforderungen für die simulative Absicherung manueller Montageprozesse ist damit nicht nur die Absicherung der Montierbarkeit des Produkts, sondern auch die effiziente realistische Nachbildung menschlicher Bewegungsabläufe während einer Montage. Unter dem Begriff der virtuellen Montagesimulation sind die vielfältigen Rechnerwerkzeuge zusammengefasst, die den Montageplaner bei der Bewältigung der simulativen Absicherung manueller Montageprozesse unterstützen. Die nach wie vor geringe Anzahl mittels digitaler Werkzeuge geplanter manueller Arbeitsplätze signalisiert die Defizite und Schwächen bestehender Systeme.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein VR-System zur virtuellen immersiven Montagesimulation (IMS) mit kraftrückkoppelnden Handschuhen entwickelt, das die offenen Optimierungspotentiale hinsichtlich Bedienerfreundlichkeit und einer realitätsnahen Interaktion adressiert. Ein zusätzliches Ziel war es, einen möglichst effizienten Simulationszyklus aus Simulationsvorbereitung, Simulationsdurchführung und Simulationsauswertung zu gewährleisten.

Anhand des Standes der Technik wurden die Defizite und der Handlungsbedarf herausgearbeitet. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen der Benutzerinteraktion im Allgemeinen und der Erfahrung mit haptischen Interaktionsgeräten im Besonderen wurden die einzelnen erforderlichen Systembestandteile zusammengestellt. Besondere Schwerpunkte lagen dabei auf der Analyse verfügbarer Handinteraktionsgeräte und der vergleichenden Untersuchung der Verfahren zur Kraftberechnung. Dies umfasste Kollisionserkennungsalgorithmen, Verfahren zur Echtzeit-Physiksimulation und haptische Renderingverfahren. Anhand der Implementierung der ausgewählten Verfahren in dem eigens entwickelten

immersiven Simulationssystem  $\text{Ve}^2$  wurde die technische Machbarkeit des Ansatzes demonstriert.

Durch  $\text{Ve}^2$  konnte gezeigt werden, dass eine virtuelle Montagesimulation, beruhend auf rein physikalischen Prinzipien, möglich ist. Der implementierte Ansatz verzichtet im Gegensatz zu bekannten Umsetzungen vollständig auf Regel- oder Logik-basierte Objektbeziehungen. Ein kürzerer Simulationszyklus durch den entfallenden Vorbereitungs Aufwand und eine realitätsnahe Interaktion sind dadurch möglich. Die Handhabungs- und Fügeoperationen basieren rein auf den physikalischen Wirkprinzipien und den vorgegebenen 3-D-Geometrien der virtuellen Objekte und des Benutzeravatars. Die Operationen werden nicht durch ein vorab definiertes Verhalten bestimmt. Falsche Simulationsaussagen durch fehlerhaft vorkonfigurierte Montagerregeln können so in  $\text{Ve}^2$  prinzipbedingt nicht auftreten. Durch den konsequent verfolgten Ansatz, die gesamte Hand bei der Objektmanipulation einzusetzen, ist es in  $\text{Ve}^2$  möglich, mit allen fünf Fingern und der Mittelhand mit den virtuellen Objekten zu interagieren. Kontaktgriffe und zirkulare oder prismatische Präzisions- und Kraftgriffe können dabei flexibel angewendet werden. Die Interaktion der insgesamt 16 Handglieder mit den virtuellen Objekten erfolgt ebenfalls ausschließlich über physikalische Prinzipien. Die Kopplung des Benutzeravatars der virtuellen Welt mit den realen Bewegungsvorgaben des Benutzers ist mittels eines speziell abgestimmten Verfahrens der virtuellen Kopplung umgesetzt.

Die realitätsnahe Interaktion und deren erfolgreicher Einsatz zur Manipulation virtueller Objekte bzw. zur virtuellen Montagesimulation wurde in einer Reihe von Experimenten aufgezeigt. Anhand der Experimente mit virtuellen Szenarien geringer Komplexität ist ersichtlich, dass eine stabile und sichere Interaktion durchgeführt werden kann. Außerdem können Fügeverfahren, die durch Zusammenlegen, An- oder Einpressen charakterisiert sind, abgebildet werden. Allerdings wird anhand der Experimente auch die Grenze der Leistungsfähigkeit des in  $\text{Ve}^2$  implementierten Ansatzes deutlich, die noch unter den für einen praktischen Einsatz erforderlichen Ansprüchen liegt.

Die aktuelle Grenze der Leistungsfähigkeit von  $\text{Ve}^2$  stellt damit auch den Anknüpfungspunkt für die weiteren zukünftigen Schritte der IMS dar. Für die nächsten Entwicklungsschritte bieten sich die folgenden Aufgabengebiete an:

Als einer der wichtigsten Schritte kann die Erweiterung bzw. Optimierung von  $\text{Ve}^2$  hinsichtlich komplexer Modelle genannt werden. Nur so kann  $\text{Ve}^2$  für den praktischen Einsatz qualifiziert werden und den heute in der Praxis verwendeten Modellgrößen entsprechen. Als vorteilhaft ist dabei die schnell fortschreitende Verbesserung der Hardwaretechnologie anzusehen, die noch große Steigerungen hinsichtlich Rechenleistung erwarten lässt.

Die Anforderung an eine leichte Bedienbarkeit des verwendeten kraftrückkoppelnden Handschuhs konnte aufgrund der Verfügbarkeit von technischen Alternativen nur ansatzweise

umgesetzt werden. Da der verfolgte Ansatz jedoch ein großes Potenzial zur Verbesserung der manuellen Montageplanung verspricht, wäre eine Verbesserung der Mechanik des kraftrückkoppelnden Handschuhs ein nächster, sehr wichtiger Entwicklungsschritt. Der gezeigte Ansatz mit einem kraftrückkoppelnden Handschuh kann nun für die zweihändige Interaktion weiter ausgebaut werden. Dies ist für den praktischen Einsatz unerlässlich, da fast alle Montagearbeiten mit oder ohne Werkzeugeinsatz im realen Umfeld mit zwei Händen durchgeführt werden.

Zur weiteren Reduktion des Vorbereitungsaufwandes empfiehlt sich entweder die automatische Berechnung der physikalischen Eigenschaften der virtuellen Körper wie z. B. der Masse, des Trägheitensors und des Massenmittelpunkts oder eine geeignete Datenschnittstelle zu 3-D-CAD-Systemen, in denen diese Daten vorliegen, so dass Doppeleingaben vermieden werden können. Darüber hinaus empfiehlt sich die vollständige datentechnische und prozessseitige Integration des hier geschaffenen Simulationswerkzeugs in den allgemeinen Produktentwicklungs- und Produktionsplanungsprozess, um die Aussagen, die mit dieser Umgebung schnell und intuitiv gewonnen werden können, optimal in eine Gesamtvorgehensweise einzubinden.

Durch diese Arbeit wurde das Potenzial aufgezeigt, das eine IMS mit kraftrückkoppelnden Handschuhen für die Montagesimulation bietet. Im Rahmen der fortschreitenden Digitalisierung des Produktentstehungsprozesses und der Produktionsplanung wird die Umsetzung dieses Potenzials durch den industriellen Einsatz weiter an Bedeutung gewinnen. Die zielstrebige Weiterentwicklung dieser Technologie ermöglicht es, neue Wettbewerbsvorteile für produzierende Unternehmen zu erschließen.





# Literaturverzeichnis

ADAMS ET AL. 1998

Adams, R. J.; Moreyra, M.; Hannaford, B.: Stability and Performance of Haptic Displays: Theory and Experiments. In: Proceedings of the ASME WAM Haptics Workshop, Anaheim (CA) / USA, 15.–20. November 1998, S. 227–234.

ADAMS ET AL. 1999

Adams, R. J.; Moreyra, M.; Hannaford, B.: Excalibur - A Three-Axis Force Display. In: Proceedings of the ASME Symposium on Haptic Interfaces, Nashville (TN) / USA, 14.–19. November 1999, S. 289–296.

ADAMS ET AL. 2001

Adams, R. J.; Klowden, D.; Hannaford, B.: Virtual Training for a Manual Assembly Task. Haptics-e 2 (2001) 2, URL <http://www.haptics-e.org>.

AGEIA 2007

Ageia: AGEIA PhysX. 2007, URL <http://www.ageia.com>, 26.05.2007.

AGGTELEKY 1987

Aggteleky, B.: Fabrikplanung - Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung, Band 1: Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten. München: Carl Hanser 1987.

ALHALABI ET AL. 2004

Alhalabi, M. O.; Daniulaitis, V.; Kawasaki, H.; Tanaka, Y.; Hori, T.: Haptic Interaction Rendering Technique for HIRO: an Opposite Human Hand Haptic Interface. In: Proceedings of EuroHaptics 2004, München, 5.–7. Juni 2004, S. 459–462.

ALT 2003

Alt, T.: Nutzenpotenziale von Augmented Reality und Augmented Vision. In: Zäh, M.; Reinhart, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik, München: Herbert Utz 2003, *iwb* Seminarbericht, Band 68, S. 6/1–6/14.

ANGSTER 1996

Angster, S.: VEDAM: Virtual Environments for Design and Manufacturing. Diss. Washington State University 1996.

ANITESCU ET AL. 1999

Anitescu, M.; Stewart, D.; Potra, T., F. A.: Time-stepping for three-dimensional rigid body dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 177 (1999) 3–4, S. 183–197.

ARLT 1999

Arlt, F.: Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell. München: Herbert Utz 1999, zgl. Diss. Technische Universität München 1999.

AVIZZANO ET AL. 2000

Avizzano, C.; Barbagli, F.; Frisoli, A.; Bergamasco, M.: The hand force feedback: analysis and control of a haptic device for the human-hand. In: *Proceedings of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Nashville (TN) / USA*, 8.–11. Oktober 2000, Band 2, S. 989–994.

BANERJEE & ZETU 2001

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

BARAFF 1994

Baraff, D.: Fast Contact Force Computation for Nonpenetrating Rigid Bodies. In: *Proceedings of the SIGGRAPH '94, Orlando (FL) / USA*, 24.–29. Juli 1994, S. 23–34.

BARAFF 1996

Baraff, D.: Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH '96, New Orleans (LA) / USA*, 4.–9. August 1996, S. 137–146.

BARAFF & WITKIN 1997

Baraff, D.; Witkin, A.: *Physically Based Modeling: Principles and Practice*. SIGGRAPH 1997 Course Notes (1997), URL <http://www.cs.cmu.edu/baraff/sigcourse/notesa.pdf>, (Juli 2004).

BARBAGLI ET AL. 2003

Barbagli, F.; Salisbury, K.; Devenzenzo, R.: Enabling Multi-finger, Multi-hand Virtualized Grasping. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. ICRA '03, Taipei / Taiwan*, 14.–19. September 2003, Band 1, S. 809–815.

BASDOGAN & SRINIVASAN 1997

Basdogan, C.; Srinivasan: Haptics in Virtual Environments: Taxonomy, Research Status, and Challenges. *Computer & Graphics* 21 (1997) 4, S. 393–404.

BASDOGAN & SRINIVASAN 2002

Basdogan, C.; Srinivasan, M. A.: *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation and Applications*, Mahwah (NJ) / USA: Lawrence Erlbaum Associates Inc. 2002, Kapitel Haptic Rendering in Virtual Environments. S. 117–134.

BASDOGAN ET AL. 1997

Basdogan, C.; Ho, C.; Srinivasan, M.: A Ray-Based Haptic Rendering Technique for Displaying Shape and Texture of 3D Objects in Virtual Environments. In: *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting - Dynamic Systems and Control Division*, Dallas (TX) / USA, 16.–21. November 1997, Band 61, S. 77–84.

BAUER 1997

Bauer, W. H.: *Entwicklung eines Systems zur virtuellen ergonomischen Arbeitsgestaltung*. Berlin: Springer 1997, (IPA-IAO Forschung und Praxis 257).

BERGAMASCO ET AL. 1994

Bergamasco, M.; Degl'Innocenti, P.; Bucciarelli, D.: A realistic approach for grasping and moving virtual objects. In: *Proceedings of the Conference on Intelligent Robots and Systems '94. Advanced Robotic Systems and the real World*, München, 12.–16. September 1994, Band 1, S. 717–724.

BIERMANN ET AL. 2002

Biermann, P.; Jung, B.; Latoschik, M.; Wachsmuth, L.: Virtuelle Werkstatt: A Platform for Multimodal Assembly in VR. In: *Proceedings of the Fourth Virtual Reality International Conference (VRIC)*, Laval / Frankreich, 19.–21. Juni 2002, S. 53–62.

BIERSCHENK ET AL. 2005

Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.; Ritter, A.: *Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2005.

BOOCH 1996

Booch, G.: *Objektorientierte Analyse und Design mit praktischen Anwendungsbeispielen*. 2. Auflage. Bonn: Addison-Wesley 1996.

BOULIC ET AL. 1996

Boulic, R.; Rezzonico, S.; Thalmann, D.: Multi-Finger Manipulation of Virtual Objects. In: Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '96), Hong-Kong / China, 1.–4. Juli 1996, S. 67–74.

BOUZIT ET AL. 2002

Bouzit, M.; Popescu, G.; Burdea, G.; Boian, R.: The Rutgers Master II-ND Force Feedback Glove. In: Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Orlando (FL) / USA, 24.–25. März 2002, S. 145–152.

BOWMAN ET AL. 2005

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

BOWMAN 1999

Bowman, D. A.: Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments. Atlanta (GA) / USA: Georgia Institute of Technology 1999.

BOWMAN ET AL. 1998

Bowman, D. A.; Hodges, L. F.; Bolter, J.: The Virtual Venue: User-Computer Interaction in Information-Rich Virtual Environments. PRESENCE - Teleoperators and Virtual Environments 7 (1998) 5, S. 478–493.

BOWMAN ET AL. 2001

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

BRAUN & KEMPF 2002

Braun, M.; Kempf, D.: Ergonomische Arbeitsgestaltung als Beitrag zu Humanisierung und Rationalisierung. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 1/2, S. 25–26.

BROWN & COLGATE 1994

Brown, J. M.; Colgate, J. E.: Physics-based Approach to Haptic Display. In: Proceedings of the 1994 International Symposium on Measurement and Control in Robotics, Topical Workshop on Virtual Reality, Houston (TX) / USA, 30. November – 3. Dezember 1994, S. 101–106.

BUCK 1999

Buck, M.: Simulation interaktiv bewegter Objekte mit Hinderniskontakten. Diss. Universität des Saarlandes 1999.

BULLINGER 1986

Bullinger, H.-J.: Systematische Montageplanung. München: Carl Hanser 1986.

BULLINGER & SOLF 1979

Bullinger, H.-J.; Solf, J.: Ergonomische Arbeitsmittelgestaltung I - Systematik. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1979, (Forschungsbericht Nr. 196).

BURDEA 1999

Burdea, G. C.: Haptic Feedback for Virtual Reality. In: Proceedings of the Virtual Reality and Prototype Workshop, Laval / Frankreich, 3.–4. Juni 1999, S. 87–96.

BURDEA & COIFFET 1994

Burdea, G. C.; Coiffet, P.: Virtual Reality Technology. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.

BURDEA & COIFFET 1996

Burdea, G. C.; Coiffet, P.: Force and Touch Feedback for Virtual Reality. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1996.

BURDEA & COIFFET 2003

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

CAMERON 1997

Cameron, S.: Enhancing GJK: Computing Minimum and Penetration Distances between Convex Polyhedra. In: Proceedings of the International conference on Robotics and Automation, Albuquerque (NM) / USA, 20.–25. April 1997, Band 4, S. 3112–3117.

CHARWAT 1994

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

CHRYSSOLOURIS ET AL. 2000

Chryssoulouris, G.; Mavrikios, D.; Fragos, D.; Karabatsou, V.: A virtual reality-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 16 (2000) 4, S. 267–276.

CHUNG & WANG 1996

Chung, K.; Wang, W.: Quick collision detection of polytopes in virtual environments. In: Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '96), Hong-Kong / China, 1.–4. Juli 1996, S. 125–131.

COHEN ET AL. 1995

Cohen, J. D.; Lin, M. C.; Manocha, D.; Pongami, M. K.: I-COLLIDE: An interactive and exact collision detection system for large-scale environments. In: Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey (CA) / USA, 9.–12. April 1995, S. 189–196.

COLGATE ET AL. 1995

Colgate, J. E.; Stanely, M.; Brown, J.: Issues in the Haptic Display of Tool use. In: Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh (PA) / USA, 5.–9. August 1995, S. 140–145.

CONNACHER ET AL. 1995

Connacher, H.; Jayaram, S.; Lyons, K.: Virtual Assembly Using Virtual Reality Techniques, online, 1995, URL <http://www.mel.nist.gov/msidlibrary/doc/cadtech95.ps>.

CUTKOSKY & HOWE 1990

Cutkosky, M.; Howe, R.: Dextrous Robot Hands. New York: Springer 1990.

DE PASCALE ET AL. 2005

de Pascale, M.; Sarcuni, G.; Prattichizzo, D.: Real-Time Soft-Finger Grasping of Physically Based Quasi-rigid Objects. In: Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Pisa / Italien, 18.–20. März 2005, S. 545–546.

DE SÁ & ZACHMANN 1999

de Sá, A. G.; Zachmann, G.: Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. Computers & Graphics 23 (1999) 3, S. 389–403.

DEML 2004

Deml, B.: Telepräsenzsysteme, Gestaltung der Mensch-System-Schnittstelle. Diss. Universität der Bundeswehr München 2004.

DEWAR ET AL. 1997

Dewar, R.; Carpenter, I. D.; Ritchie, J. M.; Simmons, J. E. L.: Assembly planning in a virtual environment. In: Proceedings of the International Conference on Management and Technology (PICMET '97), Portland (OR) / USA, 27.–31. Juli 1997, S. 664–667.

DGTECH 2006

DGTECH: Produktbeschreibung DG5-VHand. 2006, URL [http://www.dg-tech.it/new/index\\_eng\\_file/page0003.htm](http://www.dg-tech.it/new/index_eng_file/page0003.htm), 16.09.2006.

DiFRANCO ET AL. 1997

DiFranco, D.; Beauregard, G.; Srinivasan, M.: The effect of auditory cues on the haptic perception of stiffness in virtual environments. In: Rizzoni, G. (Hrsg.): Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, Dallas (TX) / USA, 15.–21. November 1997, Band DSC-Vol. 61, S. 17–22.

DIN 19226-1 1994

DIN 19226-1: Leittechnik - Regelungstechnik und Steuerungstechnik - Allgemeine Grundbegriffe, Berlin: Beuth, 1994.

DIN 8593-0 2003

DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen. Teil 0: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth, 2003.

DIN 8593-1 2003

DIN 8593-1: Fertigungsverfahren Fügen. Teil 1: Zusammensetzen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth, 2003.

DIN 8593-3 2003

DIN 8593-3: Fertigungsverfahren Fügen. Teil 3: Anpressen, Einpressen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth, 2003.

DOIL ET AL. 2003

Doil, F.; Schreiber, W.; Alt, T.; Patron, C.: Augmented reality for manufacturing planning. In: Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003 (EGVE '03), Zürich / Schweiz, 22.–23. Mai 2003, S. 71–76.

ECKSTEIN 1999

Eckstein, J.: Echtzeitfähige Kollisionserkennung für Virtual Reality Anwendungen. München: Herbert Utz 1999, zgl. Diss. Universität des Saarlandes, 1998.

EHRENSPIEL 2003

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 2. Auflage. München: Carl Hanser 2003.

ELLIS ET AL. 1997

Ellis, R. E.; Jenkins, M. A.; Sakar, N.: Numerical Methods for the Force Reflection of Contact. ASME Transactions on Dynamic Systems, Measurement and Control 4 (1997) 4, S. 768–774.

ERLER 2000

Erler, T.: Das Einsteigerseminar. UML. Landsberg: bhv 2000.

EVERSHEIM ET AL. 2001

Eversheim, W.; Weck, M.; Jahn, D.; Koschig, M.; Fricker, I.: Augmented Reality-Technologie unterstützt manuelle Montage. VDI-Z 143 (2001) 9, S. 90–92.

FABIANI ET AL. 1996

Fabiani, L.; Burdea, G.; Langrana, N.; Gomez, D.: Human interface using the Rutgers Master II force feedback interface. In: Proceedings of the VRAIS '96, Santa Clara (CA) / USA, 30. März –3. April 1996, S. 54–59.

FAKESPACE 2006

Fakespace: Produktbeschreibung Pinch Glove. 2006, URL <http://www.fakespace.com/pinch.htm>, 10.05.2006.

FCS ROBOTICS 2005

FCS Robotics: HapticMASTER. 2005, URL <http://www.fcs-cs.com/robotics/products/hapticmaster>, 08.09.2005.

FELDMANN 1997

Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Berlin: Springer 1997, zgl. Diss. Technische Universität München 1997 (*iwb* Forschungsberichte 104).

FIFTHDIMENSION 2006

Fifthdimension: Produktbeschreibung 5DT Data Glove. 2006, URL <http://www.5dt.com/hardware.html>, 10.05.2006.

FOXLIN 2002

Foxlin, E.: Handbook of Virtual Environments, Mahwah (NJ) / USA: Lawrence Erlbaum Associates Inc. 2002, Kapitel 7. S. 163–210.



## FRANKE 2003

Franke, C.: Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 28. Saarbrücken: Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM 2003.

## FRÖHLICH ET AL. 2000

Fröhlich, B.; Tramberend, H.; Beers, A.; Agrawala, M.; Baraff, D.: Physically-based manipulation on the responsive Workbench. In: Proceedings of the IEEE Virtual Realty, 2000, New Brunswick (NJ) / USA, 18.–22. März 2000, S. 5–11.

## FURUSAWA ET AL. 1998

Furusawa, R.; Abe, N.; Tanaka, K.; Matsunaga, K.; Taki, H.: Presenting states and functions of objects under assembling operation with force display device. In: Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT '98), Tokio / Japan, 21.–23. Dezember 1998, S. 175–181.

## FUSCH 2005

Fusch, T.: Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie. München: Herbert Utz 2005, zgl. Diss. Technische Universität München 2005 (*iwb* Forschungsberichte 188).

## GAMMA ET AL. 2001

Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R.; Vlides, J.: Entwurfsmuster, Programmer's Choice, Band 5. korrigierter Nachdruck. München: Addison Wesley 2001.

## GARBAYA ET AL. 2003

Garbaya, S.; Coiffet, P.; Blazevic, P.: Experiments of assembly planning in virtual environment. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Besançon / Frankreich, 10.–11. Juli 2003, S. 85–89.

## GAUSEMEIER ET AL. 1998

Gausemeier, J.; Wortmann, R.; Grafe, M.: Interactive Planning of Manufacturing Systems with Virtual Construction Sets. In: Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON '98), Aachen, 31. August – 4. September 1998, S. 2146–2151.

## GAUSEMEIER ET AL. 2002

Gausemeier, J.; Fruend, J.; Matysczok, C.: AR-Planning Tool - Designing Flexible Manufacturing Systems with Augmented Reality. In: Proceedings of Eighth Eurographics Workshop on Virtual Environments, Barcelona / Spanien, 30.–31. Mai 2002, S. 19–25.

GILBERT ET AL. 1988

Gilbert, E.; Johnson, D.; Keerthi, S.: A Fast Procedure for Computing the Distance Between Complex Objects in Three-Dimensional Space. IEEE Transactions on Robotics and Automation 4 (1988) 2, S. 193–203.

GILLESPIE & COLGATE 1997

Gillespie, R.; Colgate, J.: A Survey of Multibody Dynamics for Virtual Environments. In: Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting - Dynamic Systems and Control Division, Dallas (TX) / USA, 16.–21. November 1997, S. 45–54.

GLENCROSS ET AL. 2006

Glencross, M.; Marsh, J.; Cook, J.; Daubrenet, S.; Pettifer, S.; Hubbard, R.: DIVI-PRO: Distributed Interactive VIRTUAL PROtotyping. 2006, URL <http://citeseer.ist.psu.edu/739620.html>, 02.08.2006.

GOTTSCHALK ET AL. 1996

Gottschalk, S.; Lin, M. C.; Manocha, D.: OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH '96, New Orleans (LA) / USA, 4.–9. August 1996, S. 171–180.

GRAUPNER & BIRSCHENK 2005

Graupner, T.-D.; Bierschenk, S.: Erfolgsfaktoren bei der Einführung der Digitalen Fabrik. Industrie Management 21 (2005) 5, S. 59–62.

GREGORY ET AL. 1999

Gregory, A.; Lin, M.; Gottschalk, S.; Taylor, R. et al.: A framework for fast and accurate collision detection for haptic interaction. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference, Houston (TX) / USA, 13.–17. März 1999, S. 38–45.

GREGORY ET AL. 2000

Gregory, A.; Mascarenhas, A.; Ehmann, S.; Lin, M.; Manocha, D.: Six Degree-of-Freedom Haptic Display of Polygonal Models. In: Proceedings of the Visualization 2000, Salt Lake City (UT) / USA, 8.–13. Oktober 2000, S. 139–146.

GROSSKOPF 2004

Grosskopf, A.: Kinematische Analyse von Ziel- und Greifbewegungen der dominanten und der non-dominanten Hand bei beiden Geschlechtern. e-diss. Kiel: Christian-Albrechts-Universität 2004, URL [http://e-diss.uni-kiel.de/diss\\_1271/d1271.pdf](http://e-diss.uni-kiel.de/diss_1271/d1271.pdf).

## GRUNWALD 2002

Grunwald, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung. Herbert Utz 2002, zgl. Diss. Technische Universität München 2002 (*iwb* Forschungsberichte 159).

## GUPTA 1995

Gupta, R.: Prototyping and Design for Assembly Analysis using Multimodal Virtual Environments. Diss. Massachusetts Institute of Technology 1995.

## GUPTA ET AL. 1997A

Gupta, R.; Sheridan, T.; Whitney, D.: Experiments Using Multimodal Virtual Environments in Design for Assembly Analysis. *Presence* 6 (1997a) 3, S. 318–338.

## GUPTA ET AL. 1997B

Gupta, R.; Whitney, D.; Zeltzert, D.: Prototyping and Design for Assembly Analysis using Multimodal Virtual Environments. *Computer-Aided Design* 29 (1997b) 8, S. 585–597.

## HARWIN &amp; MELDER 2002

Harwin, W. S.; Melder, N.: Improved Haptic Rendering for Multi-Finger Manipulation Using Friction Cone based God-Objects. In: *Proceedings of the Eurohaptics Conference, 2002, Edinburgh / Großbritannien, 8.–10. Juli 2002*, S. 82–85.

## HASEGAWA &amp; SATO 2004

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

## HASEGAWA ET AL. 2003

Hasegawa, S.; Fujii, N.; Koike, Y.; Sato, M.: Real-time Rigid Body Simulation Based on Volumetric Penalty Method. In: *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Los Angeles (CA) / USA, 22.–23. März 2003*, S. 326–332.

## HEGER 1998

Heger, R.: Entwicklung eines Systems zur interaktiven Gestaltung und Auswertung von manuellen Montagetätigkeiten in der virtuellen Realität. Berlin: Springer 1998, (*IPA-IAO Forschung und Praxis* 273).

HIROTA & HIROSE 2003

Hirota, K.; Hirose, M.: Dextrous Object Manipulation Based on Collision Response. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality, Los Angeles (CA) / USA, 22.–26. März 2003, S. 232–239.

HIROTA ET AL. 1999

Hirota, K.; Hirayama, M.; Tanaka, A.; Kaneko, T.: Representation of Force in Object Manipulation. In: Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT '99), Tokio / Japan, 16.–18. Dezember 1999, S. 237–243.

HO ET AL. 1997

Ho, C.-H.; Basdogan, C.; Srinivasan, M. A.: Haptic Rendering: Point- and Ray-Based Interactions. In: Proceedings of the Second PHANTOM Users Group Workshop, Dedham (MA) / USA, 19.–22. Oktober 1997, S. 20–24.

HOLLERBACH ET AL. 2000

Hollerbach, J. M.; Cohen, E.; Thompson, W. B.; Freier, R.; Johnson, D.; Thompson II, T.: Virtual prototyping for human-Centric design. In: Proceedings of the NSF Design and Manufacturing Research Conference, Vancouver / Kanada, 3.–6. Januar 2000, S. k.A.

HUAGEN ET AL. 2004

Huagen, W.; Shuming, G.; Qunsheng, P.: Virtual grasping for virtual assembly tasks. In: Proceedings of the Third International Conference on Image and Graphics, Hong-Kong / China, 18.–20. Dezember 2004, S. 448–451.

HUDSON ET AL. 1997

Hudson, T.; Lin, M. C.; Cohen, J.; Gottschalk, S.; Manocha, D.: V-COLLIDE: Accelerated collision detection for VRML. In: Proceedings of the VRML Conference, Monterey (CA) / USA, 24.–26. Februar 1997, S. 119–125.

ICIDO 2006

ICIDO: Produktbeschreibung. 2006, URL <http://www.icido.de/de/Produkte>, 09.05.2006.

IMMERSION 2006

Immersion: 3D Interaction Products. 2006, URL <http://www.immersion.com/3d/products>, 08.01.2006.

ISHII & SATO 1993

Ishii, M.; Sato, M.: A 3D Interface Device with Force Feedback: a Virtual Work Space for Pick-and-Place Tasks. In: Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium, Seattle (WA) / USA, 18.–22. September 1993, S. 331–335.

JAYARAM ET AL. 1999A

Jayaram, S.; Jayaram, U.; Wang, Y.; Tirumali, H.; Lyons, K.; Hart, P.: VADE: A Virtual Assembly Design Environment. In: Proceedings of the Computer Graphics & Applications, Seoul / Südkorea, 5.–7. Oktober 1999a, Band 19, S. 44–50.

JAYARAM ET AL. 1999B

Jayaram, S.; Wang, Y.; Jayaram, U.; Lyons, K.; Hart, P.: A Virtual Assembly Design Environment. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference, Houston (TX) / USA, 13.–17. März 1999b, S. 172–179.

JOHNSON & WILLEMSSEN 2003

Johnson, D. E.; Willemsen, P.: Six Degree-of-Freedom Haptic Rendering of Complex Polygonal Models. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Los Angeles (CA) / USA, 22.–23. März 2003, S. 229–235.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. München: Herbert Utz 2000, zgl. Diss. Technische Universität München 2000 (*iwb* Forschungsberichte Nr. 145).

JUNG 2003

Jung, B.: Task-Level Assembly Modeling in Virtual Environments. In: Proceedings of the International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2003), Montreal / Kanada, 18.–21. Mai, Berlin: Springer 2003, Band 2669, S. 721–730.

JUNG & WACHSMUTH 1998

Jung, B.; Wachsmuth, I.: Integration of Geometric and Conceptual Reasoning for Interacting with Virtual Environments. In: Proceedings of the AAAI 1998 Spring Symposium on Multimodal Reasoning, Palo Alto (CA) / USA, 23.–25. März 1998, S. 22–27.

JUNG ET AL. 1998

Jung, B.; Latoschik, M.; Wachsmuth, I.: Knowledge-Based Assembly Simulation for Virtual Prototype Modeling. In: Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON '98), Aachen, 31. August – 4. September 1998, Band 4, S. 2152–2157.

KAWASAKI ET AL. 2003

Kawasaki, H.; Takai, J. T.; Tanaka, Y.; Mrad, C.; Mouri, T.: Control of multi-fingered haptic interface opposite to human hand. In: Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas (NV) / USA, 27.–31. Oktober 2003, Band 3, S. 2707–2712.

KIJIMA & HIROSE 1995

Kijima, R.; Hirose, M.: Fine object manipulation in virtual environment. In: Selected papers of the Eurographics workshops on Virtual environments '95, Barcelona / Spanien September 1993 und Monte Carlo / Monaco Januar 1995, Wien: Springer 1995, S. 42–58.

KIM ET AL. 2002A

Kim, Y. J.; Lin, M.; Manocha, D.: DEEP: Dual-space Expansion for Estimating Penetration depth between convex polytopes. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington DC / USA, 11.–15. Mai 2002a, Band 1, S. 921–926.

KIM ET AL. 2002B

Kim, Y. J.; Otaduy, M.; Lin, M. C.; Manocha, D.: Six-Degree-Of-Freedom Haptic Display Using Localized Contact Computations. In: Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Orlando (FL) / USA, 24.–25. März 2002b, S. 209–216.

KLOCKE & STRAUBE 2004

Klocke, F.; Straube, A. M.: VR-Einsatz in der produzierenden Industrie. VDI-Z 146 (2004) 1&2, S. 6–7.

KOHNO ET AL. 2001

Kohno, Y.; Walairacht, S.; Hasegawa, S.; Koike, Y.; Sato, M.: Evaluation of Two-Handed Multi-Finger Haptic Device SPIDAR-8. In: Proceedings of the 11th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2001), Tokio / Japan, 5.–7. Dezember 2001, S. 135–140.

KONOLD & REGER 1997

Konold, P.; Reger, H.: Angewandte Montagetechnik - Produktgestaltung, Planung, Systeme und Komponenten. Braunschweig: Vieweg & Sohn 1997.

KUGELMANN 1999

Kugelman, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. München: Herbert Utz 1999, zgl. Diss. Technische Universität München 1999 (*iwb* Forschungsberichte 127).

LIN & CANNY 1991

Lin, M. C.; Canny, J. F.: A Fast Algorithm for Incremental Distance Calculation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento (CA) / USA, 9.-11. April 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 the Mathematics of Surfaces (IMA-98), Birmingham / Großbritannien, 31. August - 2. September, Winchester: Information Geometers 1998, Mathematics of Surfaces, Band 8, S. 37-56.

LIU 2003

Liu, Y.: Design of Spatial Interfaces for Engineering Assembly within a Virtual Environment. Diss. Keyworth Institute of Manufacturing, Informatics Research Laboratory, School of Computing, University of Leeds 2003.

LOGITECH 2006

Logitech: Gamepads. 2006, URL <http://www.logitech.com/index.cfm/products/productlist/DE/DE,crid=2216,categoryId=429>, 08.01.2006.

LOTTER 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage: ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. 2. Auflage. Düsseldorf: VDI 1992.

LOTTER & SCHILLING 1994

Lotter, B.; Schilling, W.: Manuelle Montage. Düsseldorf: VDI 1994.

LOTTER ET AL. 1998

Lotter, B.; Hartel, M.; Menges, R.: Manuelle Montage - wirtschaftlich gestalten. Esslingen: Expert 1998.

LOTTER 2004

Lotter, E.: Rationalisierungspotential der manuellen Kleingerätemontage. In: Tagungsband des 18. Deutschen Montagekongresses, Fundamentale Kostensenkung, München, 26.–27. April 2004, S. 358–372.

LOVE & BOOK 1995

Love, L.; Book, W.: Contact Stability Analysis of Virtual Walls. In: Proceedings of the Dynamic Systems and Control Division, San Francisco (CA) / USA, 12.–17. November 1995, Band DSC-57, S. 689–694.

LUCIANO ET AL. 2004

Luciano, C.; Banerjee, P.; DeFanti, T.; Mehrotra, 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, Chicago (IL) / USA, 27.–28. März und Laval / Frankreich, 27.–31. März 2004, S. 282–289.

MAKHOUL & SCHWARTZ 1995

Makhoul, J.; Schwartz, R.: State of the Art in Continuous Speech Recognition. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, Cambridge (MA) / USA, 24. Oktober 1995, Band 92, S. 9956–9963.

MANETTA & BLADE 1995

Manetta, C.; Blade, R.: Glossary of Virtual Reality Terminology. International Journal of Virtual Reality: A Multimedia Publication for Professionals 1 (1995) 2, S. 35–39.

MARSH ET AL. 2004

Marsh, J.; Glencross, M.; Pettifer, S.; Hubbold, R. J.; Cook, J.; Daubrenet, S.: Minimising latency and maintaining consistency in distributed virtual prototyping. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry (VRCAI '04), Singapur, 16.–18. Juni, New York: ACM Press 2004, S. 386–389.

MCNEELY ET AL. 1999

McNeely, W.; Puterbaugh, K.; Troy, J.: Six Degree-of-Freedom Haptic Rendering Using Voxel Sampling. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH, Los Angeles (CA) / USA, 8.–13. August 1999, S. 401–408.



MEASURAND INC. 2006

Measurand Inc.: Produktbeschreibung. 2006, URL <http://www.measurand.com/products/products.html>, 16.09.2006.

MINER ET AL. 1996

Miner, N.; Gillespie, B.; Caudell, T.: Examining the Influence of Audio and visual Stimuli on a Haptic Interface. In: Proceedings of the IMAGE Conference, Phoenix (AZ) / USA, 23.–25. Juni 1996, S. 23–35.

MIRTICH 1997

Mirtich, B.: V-Clip: Fast and robust polyhedral collision detection. ACM Transactions on Graphics 17 (1997) 3, S. 177–208.

MIRTICH 1998

Mirtich, B.: Rigid Body Contact: Collision Detection to Force Computation. Technical Report TR98-01, Mitsubishi Electric Research Laboratory, 1998.

MIRTICH & CANNY 1995

Mirtich, B.; Canny, J. F.: Impulse-Based Simulation of Rigid Bodies. In: Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey (CA) / USA, 9.–12. April 1995, S. 181–188.

MIRTICH 1996

Mirtich, B. V.: Impulse-based Dynamic Simulation of Rigid Body Systems. Diss. University of California, Berkeley 1996.

MOORE & WILHELMS 1988

Moore, M.; Wilhelms, J.: Collision Detection and Response from Computeranimation. Computer Graphics 22 (1988) 4, S. 289–298.

MORGENBESSER & SRINIVASAN 1996

Morgenbesser, H.; Srinivasan, M.: Force Shading for Haptic Shape Perception. In: Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division, Atlanta (GA) / USA, 17.–22. November 1996, Band 58, S. 407–412.

MURAYAMA ET AL. 2004

Murayama, J.; Bougrila, L.; Luo, Y.; Akahane, K.; Hasegawa, S.; Hirsbrunner, B.; Sato, M.: SPIDAR G&G: A Two-Handed Haptic Interface for Bimanual VR Interaction. In: Proceedings of the EuroHaptics 2004, München, 5.–7. Juni 2004, S. 138–146.

MURRAY & FERNANDO 2004

Murray, N.; Fernando, T.: An Immersive Assembly and Maintenance Simulation Environment. In: Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications, Budapest / Ungarn, 21.–23. Oktober 2004, S. 159–166.

NEUGEBAUER ET AL. 2004

Neugebauer, R.; Weidlich, D.; Kolbig, S.; Polzin, T.: Perspektiven von Virtual-Reality-Technologien in der Produktionstechnik - VRAX. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Tagungsband des 4. Chemnitzer Produktionstechnischen Kolloquiums: Technologische Innovation für die Antriebs- und Bewegungstechnik, Chemnitz, 21.–22. September 2004, S. 333–347.

NEUGEBAUER ET AL. 2007

Neugebauer, R.; Weidlich, D.; Zickner, H.; Polzin, T.: Virtual reality aided design of parts and assemblies. International Journal on Interactive Design and Manufacturing 1 (2007) 1, S. 15–20.

NODNA 2006

nodna: Produktbeschreibung. 2006, URL [http://www.nodna.com/X-IST\\_products.7.0.html?&L=1](http://www.nodna.com/X-IST_products.7.0.html?&L=1), 16.09.2006.

NORMAN 1989

Norman, D.: Dinge des Alltags: gutes Design und Psychologie für Gebrauchsgegenstände. Frankfurt a. Main: Campus 1989.

OPENSCENEGAPH 2007

OpenSceneGraph: Produktbeschreibung. 2007, URL <http://www.openscenegraph.org>, 04.04.2007.

PATRON 2005

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

PETZOLD ET AL. 2004

Petzold, B.; Zaeh, M. F.; Faerber, B.; Deml, B.; Egermeier, H.; Schilp, J.; Clarke, S.: A Study on Visual, Auditory, and Haptic Feedback for Assembly Tasks. PRESENCE - Teleoperators and Virtual Environments 13 (2004) 1, S. 16–21.

POTEL 1998

Potel, M.: Motion sick in cyberspace. *Computer Graphics and Applications* 18 (1998) 1, S. 16–21.

POTINECKE & SLAMA 2005

Potinecke, T.; Slama, A.: Virtual Engineering optimal nutzen. *Industrie Management* 21 (2005) 5, S. 55–58.

RAGHAVAN ET AL. 1999

Raghavan, V.; Molineros, J.; Sharma, R.: Interactive evaluation of assembly sequences using augmented reality. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15 (1999) 3, S. 435–449.

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 International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne / Schweiz, 30. September – 5. Oktober 2002, Band 3*, S. 2329–2343.

REINHART 2000

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G. (Hrsg.): ... nur der Wandel bleibt, München: Herbert Utz 2000, Tagungsband zum Münchner Kolloquium, S. 19–40.

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): *Marktchance Individualisierung*. Berlin: Springer 2003.

REINHART ET AL. 1999

Reinhart, G.; Grunwald, S.; Rick, F.: *Virtuelle Produktion - Technologie für die Zukunft. VDI-Z Special C-Techniken* (1999), S. 26–29.

REZZONICO ET AL. 1995

Rezzonico, S.; Boulic, R.; Huang, Z.; Thalmann, N. M.; Thalmann, D.: Consistent grasping in virtual environments based on the interactive grasping automata. In: *Selected papers of the Eurographics workshops on Virtual environments '95 (VE '95), Barcelona / Spanien September 1993 und Monte Carlo / Monaco Januar 1995*, Wien: Springer 1995, S. 107–118.

RICHARD & COIFFET 1999

Richard, P.; Coiffet, P.: Dextrous Haptic Interaction in Virtual Environments : Human Performance Evaluations. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction, Pisa / Italien, 27.–29. September 1999, S. 315–320.

RIJPKEMA & GIRARD 1991

Rijpkema, H.; Girard, M.: Computer animation of knowledge-based human grasping. In: Sederberg, T. W. (Hrsg.): Proceedings of the Computer Graphics (SIGGRAPH '91), Las Vegas (NV) / USA, 28. Juli –2. August 1991, Band 25, S. 339–348.

ROHLING & HOLLERBACH 1993

Rohling, R. N.; Hollerbach, J. M.: Optimized fingertip mapping for teleoperation of dextrous robot hands. In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, Atlanta (GA) / USA, 2.–6. Mai 1993, Band 3, S. 769–775.

ROLLAND ET AL. 2001

Rolland, J. P.; Davis, L. D.; Baillot, Y.: A Survey of Tracking Technologies for Virtual Environments. Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality (2001), S. 67–112.

ROSSGODERER 2002

Rossgoderer, U.: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen. München: Herbert Utz 2002, zgl. Diss. Technische Universität München 2002 (*iwb* Forschungsberichte 168).

RÖSSLER 2001

Röckler, A.: Ein System für die Entwicklung von räumlichen Benutzungsschnittstellen, Berichte aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, Band 334. Heimsheim: Jost-Jetter 2001.

RUDOLF 2006

Rudolf, H.: Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. München: Herbert Utz 2006, zgl. Diss. Technische Universität München 2006 (*iwb* Forschungsberichte 204).

SALISBURY ET AL. 1995

Salisbury, J. K.; Brock, D.; Massie, T.; Swarup, N.; Zilles, C.: Haptic Rendering: Programming touch interaction with virtual objects. In: Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey (CA) / USA, 9.–12. April 1995, S. 123–130.

SALISBURY ET AL. 2004

Salisbury, K.; Conti, F.; Barbagli, F.: Haptic rendering: introductory concepts. *Computer Graphics and Applications* 24 (2004) 2, S. 24–32.

SANSO & THALMANN 1994

Sanso, R. M.; Thalmann, D.: A hand control and automatic grasping system for synthetic actors. *Computer Graphics Forum* 13 (1994) 3, S. 167–177.

SATO 2002

Sato, M.: SPIDAR and Virtual Reality. In: *Proceedings of the 5th Biannual World Automation Congress, Orlando (FL) / USA, 9.–13. Juni 2002, Band 13, S. 17–23.*

SAUER & SCHÖMER 1998

Sauer, J.; Schömer, E.: A constraint-based approach to rigid body dynamics for virtual reality applications. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '98), Taipei / Taiwan, 2.–5. November 1998, S. 153–162.*

SAVALL ET AL. 2002

Savall, J. S.; Borro, D.; Gil, J. J.; Matey, L.: Description of a haptic system for virtual maintainability in aeronautics. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and System, 2002, Lausanne / Schweiz, 30. September – 5. Oktober 2002, Band 3, S. 2887–2892.*

SCHACK 2007

Schack, R.: *Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik*. München: Herbert Utz 2007, zgl. Diss. Technische Universität München 2007 (*iwb Forschungsberichte* 207).

SCHÄFER 1992

Schäfer, G.: *Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung*. München: Carl Hanser 1992.

SCHIMKE 1991

Schimke, E.: *Montageplanung: Methoden, Fallbeispiele, Praxiserfahrung*. Düsseldorf: VDI 1991.

SCHUSTER 1992

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

SENSABLE 2005

Sensible: PHANTOM Devices. 2005, URL [http://www.sensible.com/products/phantom\\_ghost/phantom.asp](http://www.sensible.com/products/phantom_ghost/phantom.asp), 31.08.2005.

SHAIKH ET AL. 2004

Shaikh, I.; Jayaram, U.; Jayaram, S.; Palmer, C.: Participatory ergonomics using VR integrated with analysis tools. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Washington DC / USA, 5.–8. Dezember 2004, Band 2, S. 1746–1754.

SHERIDAN 1992

Sheridan, T. B.: Musings on telepresence and virtual presence. PRESENCE - Teleoperators and Virtual Environments 1 (1992) 1, S. 120–126.

SHERRICK & CRAIG 1992

Sherrick, C.; Craig, J.: Tactual Perception - A Source Book, Cambridge University Press 1992. S. 55–81.

SHIMOGA 1992

Shimoga, K.: Finger Force and Touch Feedback Issues in Dextrous Telemanipulation. In: Proceedings of the NASA-CIRSSE International Conference on Intelligent Robotic Systems for Space Exploration, Troy (NY) / USA, 30. September – 1. Oktober 1992, S. 159–178.

SMITH 2004A

Smith, R.: Open Dynamics Engine, 2004a, URL <http://ode.org>, 15.09.2004.

SMITH 2004B

Smith, R.: Open Dynamics Engine v0.5 User Guide. 2004b, URL <http://ode.org/ode-latest-userguide.html>, 10.12.2004.

SRINIVASAN & CHEN 1993

Srinivasan, M.; Chen, J.: Human Performance in Controlling Normal Forces of Contact with Rigid Objects. In: Proceedings of the Advances in Robotics Mechatronics, and Haptic Interfaces, New Orleans (LA) / USA, 28. November – 3. Dezember 1993, Band DSC-49, S. 119–225.

STADLER 1997

Stadler, M.: Handbuch Arbeitswissenschaft, Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1997. S. 401–404.

STANNEY ET AL. 1998

Stanney, K. M.; Mourant R. R.; Kennedy, R. S.: Human Factors Issues in Virtual Environments. PRESENCE - Teleoperators and Virtual Environments 7 (1998) 4, S. 327–351.

STEFFAN 2001

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

STEFFAN & KUHLEN 2001

Steffan, R. A.; Kuhlen, T.: MAESTRO - a tool for interactive assembly simulation in virtual environments. In: Fröhlich, B.; Deisinger, J.; Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Proceedings of the joint IAO and EG Workshop, Stuttgart, 16.–18. Mai, Wien: Springer 2001, S. 141–152.

STEWART 1998

Stewart, D. E.: Convergence of a time-stepping scheme for rigid body dynamics and resolution of Painlevé's problems. Archive Rational Mechanics and Analysis 145 (1998) 3, S. 215–260.

SUNDARAJ ET AL. 2000

Sundaraj, K.; d'Aulignac, D.; Mazer, E.: A New Algorithm for computing Minimum Distance. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS), Takamatsu / Japan, 31. Oktober – 5. November 2000, Band 3, S. 2115–2120.

SUTHERLAND 1965

Sutherland, I. E.: The ultimate display. In: Proceedings of the IFIPS Congress, New York (NY) / USA, 24.–29. Mai 1965, Band 2, S. 506–508.

TAN ET AL. 1994

Tan, H.; Srivasan, M.; Eberman, B.; Cheng, B.: Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces. In: Proceedings of the ASME WAM, Chicago (IL) / USA, 6.–11. November 1994, Band DSC-55, S. 353–360.

THOMPSON II ET AL. 1997

Thompson II, T. V.; Nelson, D. D.; Cohen, E.; Hollerbach, J.: Maneuverable NURBS Models within a Haptic Virtual Environment. In: Proceedings of the 6th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Dallas (TX) / USA, 15.–21. November 1997, S. 37–44.

TRINKLE ET AL. 1997

Trinkle, J. C.; Stewart, D. E.; J.-S. Pang and M.C. Ferris: Complementarity and Variational Problems: State of the Art, Philadelphia (PA) / USA: SIAM 1997. S. 425–439.

TURK 1992

Turk, G.: Greg Turk. Re-tiling polygonal surfaces. In: Catmull, E. E. (Hrsg.): Proceedings of the SIGGRAPH '92, 1992, Band 26, S. 55–64.

TZAFESTAS 2003

Tzafestas, C. S.: Whole-Hand Kinesthetic Feedback and Haptic Perception in Dextrous Virtual Manipulation. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans 33 (2003) 1, S. 100–113.

TZAFESTAS & COIFFET 1997

Tzafestas, C. S.; Coiffet, P.: Computing optimal forces for generalised kinesthetic feedback on the human hand during virtual grasping and manipulation. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque (NM) / USA, 20.–25. April 1997, Band 1, S. 118–123.

ULLMANN & SAUER 2000

Ullmann, T.; Sauer, J.: Intuitive virtual grasping for non haptic environments. In: Proceedings of the Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Hong-Kong / China, 3.–5. Oktober 2000, S. 373–457.

VAN DEN BERGEN 1997

van den Bergen, G.: Efficient Collision Detection of Complex Deformable Models using AABB Trees. Journal of Graphic Tools 4 (1997) 2, S. 1–13.

VAN DEN BERGEN 1999

van den Bergen, G.: A Fast and Robust GJK Implementation for Collision Detection of Convex Objects. Journal of Graphics Tools 2 (1999) 4, S. 7–25.

VAN DEN BERGEN 2001

van den Bergen, G.: Proximity Queries and Penetration Depth Computation on 3D Game Objects. In: Proceedings of the Game Developers Conference, San Jose (CA) / USA, 20.–24. März 2001, S. k.A.

VAN DEN BERGEN 2004

van den Bergen, G.: Collision Detection in Interactive 3D Environments. Series in Interactive 3D Technology. Amsterdam: Morgan Kaufmann Publishers 2004.



VDI 2815 1978

VDI 2815: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung, Düsseldorf: VDI, 1978.

VDI 2860 1990

VDI 2860: Montage und Handhabungstechnik, Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Düsseldorf: VDI, 1990.

VDI 3633 1993

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß und Produktionssystemen, Düsseldorf: VDI, 1993.

VDI 3657 1993

VDI 3657: Ergonomische Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen, Beuth GmbH, 1993.

VDI 4006 2002

VDI 4006: Menschliche Zuverlässigkeit - Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung, Beuth GmbH, 2002.

VIDEOGAMEALLIANCE 2006

VideoGameAlliance: Produktbeschreibung P5 Glove. 2006, URL [http://www.videogamealliance.com/VGA/video\\_game/P5.php](http://www.videogamealliance.com/VGA/video_game/P5.php), 16.09.2006.

WACHSMUTH ET AL. 2001

Wachsmuth, I.; Voss, I.; Sowa, T.; Latoschik, M.; Kopp, S.; Jung, B.: Multimodale Interaktion in der Virtuellen Realität. In: Oberquelle, H.; Oppermann, R.; (Hrsg.), J. K. (Hrsg.): Mensch & Computer, Stuttgart: Teubner 2001, S. 265–274.

WALAIRACHT ET AL. 1999

Walairacht, S.; Yamada, K.; Koike, Y.; Sato, M.: Modeling Virtual Hands with Haptic Interface Device. In: Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT '99), Tokio / Japan, 16.–18. Dezember 1999, S. 233–236.

WANN & MON-WILLIAMS 1996

Wann, J.; Mon-Williams, M.: What does virtual reality NEED? Human factors issues in the design of three-dimensional computer environments. International Journal of Human-Computer Studies 44 (1996), S. 829–847.

WATT 2002

Watt, A.: 3D-Computergrafik. Informatik, 3. Auflage. München: Pearson Education Deutschland 2002.

WEHR 2005

Wehr, M.: Die Hand - Werkzeug des Geistes. 1. Auflage. München: Elsevier GmbH, Spektrum Akademischer 2005.

WEIDLICH ET AL. 2006

Weidlich, D.; Benölken, P.; Riegel, J.; Scherer, S.: Intuitive Konfiguration von Werkzeugmaschinen in der Virtuellen Realität. In: Proceedings of the 17th Conference of Simulation and Visualization, Magdeburg, 2.-3. März 2006, S. 231-243.

WEISS 2002

Weiß, H.: DIVIPRO: Distributed Virtual Prototyping - D5 Final Report On Advanced Utilities. CORDIS RTD-PROJECTS - Project Reference: IST-1999-11421, 2002.

WENDEROTH 2002

Wenderoth, A.: Herausforderungen globale Massenproduktion. In: Tagungsband 17. Deutscher Montagekongress, München, 9.-10. Oktober, Landsberg: Moderne Industrie 2002, S. k.A.

WESTKÄMPER 2003

Westkämper, E.: Digitale und virtuelle Welten in der Fabrik von Morgen. In: Die wandlungsfähige Fabrik, IFA-Fachtagung 2003, Hannover, 20.-21. März 2003, S. 43-63.

WIKER ET AL. 1989

Wiker, S.; Hershkowitz, E.; Zik, J.: Teleoperator Comfort and Psychometric Stability: Criteria for Limiting Master-Controller Forces of Operation and Feedback During Telemanipulation. In: Proceedings of the NASA Conference on Space Telerobotics, Pasadena (CA) / USA, 31. Januar - 2. Februar 1989, Band 1, S. 99-107.

YE ET AL. 1999

Ye, N.; Banerjee, P.; Banerjee, A.; Dech, F.: A Comparative Study of Assembly Planning in Traditional and Virtual Environments 29 (1999) 4, S. 546-555.

YUAN & SUN 1997

Yuan, X.; Sun, H.: Mechanical assembly with data glove devices. In: Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, St. Johns / Kanada, 25.-28. Mai 1997, Band 1, S. 177-180.

ZACHMANN 2000

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

ZÄH ET AL. 2002

Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Petzold, B.; Patron, C.: Force Feedback in VR/AR-Anwendungen - Grundlagen, Bewertungsgrößen und technische Integration. In: Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn, 11.–12. Juni 2002, S. 55–66.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Carnevale, M.; Schack, R.; Müller, S.: Methode zur Umsetzung der Digitalen Fabrik in der Industrie. *Industrie Management* 21 (2005) 5, S. 15–18.

ZILLES & SALISBURY 1995

Zilles, C. B.; Salisbury, J. K.: A Constraint-based God-object Method for Haptic Display. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems '95*, Pittsburgh (PA) / USA, 5.–9. August 1995, Band 3, S. 146–151.



# A Anhang

## A.1 Unified Modeling Language (UML)

### A.1.1 Allgemeines

Die folgenden Abschnitte beschreiben ausschließlich die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Elemente der UML-Gesamtspezifikation. Detaillierte Informationen über weitere Elemente, Beschreibungsmethoden und Anwendungen des UML-Standards können z. B. in BOOCH (1996), ERLER (2000) sowie GAMMA ET AL. (2001) nachgeschlagen werden.

### A.1.2 Statische Beschreibung

Für die statische Beschreibung der Softwarestruktur von  $\text{Ve}^2$  werden Klassendiagramme eingesetzt, wie in Abbildung A.1 und A.2 zu sehen. Eine Klasse ist durch ein einfaches Rechteck gekennzeichnet und definiert eine Menge von Objekten mit gleichen Eigenschaften. Sie beschreibt den Zustand dieser Objekte durch Attribute und ihr Verhalten durch Funktionen. Pakete stellen eine den einzelnen Klassen übergeordnete Struktur dar und umfassen alle Klassen eines bestimmten Problembereichs. Die Klassen verschiedener Pakete können voneinander abhängig sein, was durch einen gestrichelten Pfeil zwischen den Paketen angedeutet wird. So ist z. B. *Paket B* aus Abbildung A.1 von *Paket A* abhängig.

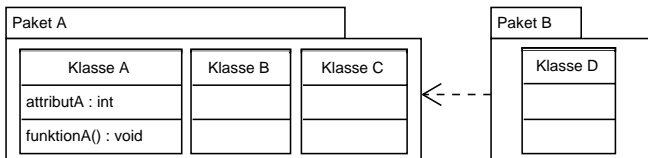


Abbildung A.1: Für  $\text{Ve}^2$  verwendete Elemente eines UML-Klassendiagramms zur Darstellung von Softwarepaketen

Die Beziehung verschiedener Klassen untereinander kann durch Vererbung oder durch eine Assoziation und deren spezielle Ausprägungen der Aggregation oder der Komposition gekennzeichnet sein. Die Vererbung ist eines der wesentlichen Konzepte der objektorientierten Softwareentwicklung. Es bedeutet die Erweiterung bzw. Spezialisierung der Eigenschaften (Attribute/Funktionen) einer sog. Vater-Klasse durch eine sog. Kind-Klasse. So ist, wie in Abbildung A.2 gezeigt, die *Klasse B* eine Spezialisierung der *Klasse A*. Diese Beziehung wird durch einen Pfeil symbolisiert.

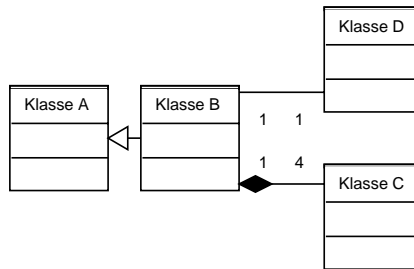


Abbildung A.2: Für  $Ve^2$  verwendete Elemente eines UML-Klassendiagramms zur Darstellung der Beziehungen zwischen Klassen

Im Gegensatz dazu beschreibt eine Assoziation die Beziehung zwischen Klassen bzw. deren Instanzen im Hinblick auf deren Verbindung. Über eine Assoziation können Objekte der verbundenen Klassen kommunizieren. Wie in Abbildung A.2 ersichtlich, sind die *Klasse B* und die *Klasse D* mittels einer Assoziation, symbolisiert durch eine Linie, verbunden. Die Zahlen unter der Assoziation stehen für die Kardinalität der Verbindung bzw. kennzeichnen, wieviele Objekte jeweils miteinander in Verbindung stehen.

Eine spezielle Form der Assoziation ist die Aggregation bzw. die Komposition. Bei dieser Beziehung setzen sich Objekte einer Klasse aus den Objekten einer anderen Klasse zusammen. So besteht ein Objekt der *Klasse B*, das sog. Aggregat, u. a. aus vier Objekten der *Klasse C* (Abbildung A.2). Die Komposition ist eine Spezialform der Aggregation, die durch eine Linie mit einer unausgefüllten Raute symbolisiert wird. Eine Komposition ist im Gegensatz dazu durch eine Linie, an deren Ende sich eine ausgefüllte Raute befindet, gekennzeichnet. Der wesentliche Unterschied zwischen einer Komposition und einer Aggregation besteht darin, dass die einzelnen Teile ohne das Aggregat nicht bestehen können, das Aggregat allerdings ohne seine Teile.

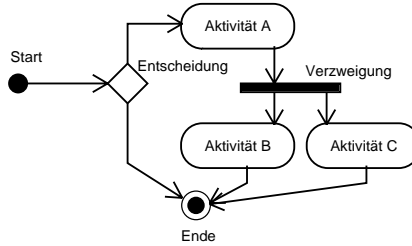


Abbildung A.3: Für  $Ve^2$  verwendete Elemente eines UML-Aktivitätendiagramms

### A.1.3 Dynamische Beschreibung

Für die dynamische Beschreibung der Abläufe von  $Ve^2$  werden Aktivitätendiagramme eingesetzt, wie in Abbildung A.3 dargestellt. Aktivitätendiagramme sind eine besondere Form der Zustandsdarstellung. Systemzustände sind in Aktivitätendiagrammen mit Verarbeitungen bzw. Aktivitäten verknüpft. So erfolgt ein Zustandsübergang in einem Aktivitätendiagramm durch die Beendigung eines mit einem Zustand verbundenen Verarbeitungsvorgangs. Die einzelnen Beschreibungselemente eines Zustandsdiagramms sind in Abbildung A.3 veranschaulicht. Der erforderliche Ausgangspunkt (*Start*) und der Endpunkt (*Ende*) werden jeweils durch unterschiedliche Kreise symbolisiert. Die einzelnen Aktivitäten sind durch abgerundete Rechtecke gekennzeichnet. Die Zustandsübergänge nach Beendigung einer Aktivität, auch Transitionen genannt, werden durch Pfeile dargestellt. Eine Aktivität kann mehrere Transitionen besitzen, die an bestimmte Bedingungen geknüpft sind. Diese Entscheidungspunkte werden in Aktivitätendiagrammen durch Rauten modelliert. Ebenso kann sich eine Aktivität in mehrere darauffolgende Aktivitäten verzweigen oder mehrere Aktivitäten können zu einer einzelnen zusammengeführt bzw. synchronisiert werden. Die Modellierung dieser Transitionen erfolgt durch einen waagerechten schwarzen Balken.

## A.2 Berechnung der Durchdringungstiefe

Der in VAN DEN BERGEN (2004) beschriebene Kollisionserkennungsalgorithmus GJK verwendet zur Ermittlung der Durchdringungstiefe zweier Körper eine mathematische Operation, die sog. Minkowski-Summe  $A + B$  zweier Körper  $A$  und  $B$ . Diese ist gemäß Gleichung A.1 definiert:

$$\mathbb{A}, B \subset \mathbb{R}^3, \quad A + B := \{a + b; a \in A, b \in B\} \quad (\text{A.1})$$

Damit die Minkowski-Summe jedoch zur Ermittlung der Durchdringungstiefe zweier Körper eingesetzt werden kann, ist die Einführung einer entsprechenden negativen Operation, der sog. Minkowski-Differenz, erforderlich. Dafür wird  $-B$  definiert:

$$-B = \{-b : b \in B\}, \quad (\text{A.2})$$

Basierend auf Gleichung A.2 kann nun der Term  $A + B$  aus Gleichung A.1 als  $A + (-B)$  ausgedrückt werden, was wiederum zu der Minkowski-Differenz  $A - B$  abgekürzt wird. Daraus folgend gilt im Falle der Kollision zweier Körper der in Gleichung A.3 gezeigte Zusammenhang:

$$A \cap B \neq \emptyset \Leftrightarrow 0 \in A - B, \quad (\text{A.3})$$

Dabei steht 0 für den Ursprung. Die Durchdringungstiefe  $p(A, B)$  kann dann wie in Gleichung A.4 ausgedrückt werden:

$$p(A, B) = \inf \{\|x\| : x \notin A - B\}, \quad (\text{A.4})$$

Die Durchdringungstiefe  $p(A, B)$  ist damit gleichbedeutend mit der kürzesten Entfernung des Ursprungs 0 zum Rand von  $A - B$ . Siehe auch Abbildung 3.8 (S. 60) für die grafische Darstellung dieses mathematischen Problems.

### A.3 Verwendete Software

Produktbezeichnung	Verwendungszweck	Hersteller/Quelle
ArgoUML 0.24	UML-Editor	Software Freedom Conservancy, Broadway 17th Floor New York, NY 10023, USA <a href="http://argouml.tigris.org">http://argouml.tigris.org</a>
Autodesk 3ds Max	3-D-Modellierung	Autodesk GmbH Aidenbachstr. 56 81379 München <a href="http://www.autodesk.com">www.autodesk.com</a>
Blender 2.4.1	3-D-Modellierung	Blender Institute BV Entrepotdok 57A 1018 AD Amsterdam, Niederlande <a href="http://www.blender.org">www.blender.org</a>

Tabelle A.1: Für die Entwicklung von  $Ve^2$  verwendete Software



Produktbezeichnung	Verwendungszweck	Hersteller/Quelle
CATIA V5	3-D-CAD-Software	IBM Deutschland Am Fichtenberg 71083 Herrenberg www.ibm.com
gcc/g++ 3.3.4	freier C/C++-Compiler	www.gcc.gnu.org
GSL-1.1.1	freie Softwarebibliothek für numerische Mathematik	www.gnu.org/software/gsl/
KDevelop 3.2.0	freie Softwareentwicklungsum- gebung	www.kdevelop.org
Linux RedHat 9.0	Betriebssystem	Red Hat GmbH Hauptstätter Str. 58 70178 Stuttgart www.redhat.de
Matlab	kommerzielle Software zur Lö- sung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse	The MathWorks GmbH Adalperostr. 45 85737 Ismaning www.mathworks.de
Octave 2.1.64	freie Software zur Lösung ma- thematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Er- gebnisse	University of Wisconsin, Department of Chemi- cal Engineering, Madison WI 53719, USA www.octave.org
ODE 0.5	freie Softwarebibliothek für die Echtzeit-Physiksimulation	Russel L. Smith www.ode.org
OpenSceneGraph 0.9.9	freie Softwarebibliothek für die Echtzeit-3-D-Visualisierung	OSG Community www.openscenegraph.org
ProEngineer	3-D-CAD-Software	Parametric Technology GmbH, Edisonstrasse 8 85716 Unterschleißheim www.ptc.com
Qhull 2003.1	freier Hüllkörper-Generator	www.qhull.org
SOLID 3.5	Softwarebibliothek für Kollisi- onserkennung	Gino van den Bergen www.dtecta.com

Tabelle A.1: Für die Entwicklung von  $Ve^2$  verwendete Software

Produktbezeichnung	Verwendungszweck	Hersteller/Quelle
Virtual Hand Suite 2000	Gerätetreiber für CyberGrasp <sup>TM</sup>	Immersion Corporation, 801 Fox Lane, San Jose, CA 95131, U.S.A. <a href="http://www.immersion.com">www.immersion.com</a>
Xerces 2.3.0	freier XML-Parser	The Apache Software Foundation, 1901 Munsey Drive Forest Hill, MD 21050-2747, U.S.A. <a href="http://xml.apache.org">http://xml.apache.org</a>

Tabelle A.1: Für die Entwicklung von  $Ve^2$  verwendete Software

## A.4 Verwendete Hardware

Produktbezeichnung	Verwendungszweck	Hersteller/Quelle
A.R.T.-Track	optisches Positionserfassungssystem mit 3-D-Stylus	Advanced Real-time Tracking GmbH Am Öferl 6 82362 Weilheim <a href="http://www.ar-tracking.de">www.ar-tracking.de</a>
CyberGrasp <sup>TM</sup> , CyberGlove <sup>®</sup>	kraftrückkoppelnder Handschuh mit gesondertem Sensorhandschuh	Immersion Corporation, 801 Fox Lane, San Jose, CA 95131, U.S.A. <a href="http://www.immersion.com">www.immersion.com</a>
IC:ONE	passives 3-D-Stereo-Display (Powerwall)	ICIDO GmbH Jurastrasse 8 70565 Stuttgart <a href="http://www.icido.de">www.icido.de</a>
HP Workstation XW 6200	PC-Workstation	Hewlett-Packard GmbH Herrenberger Str. 140 71034 Böblingen <a href="http://www.hp.com">www.hp.com</a>

Tabelle A.2: Für die Umsetzung von  $Ve^2$  verwendete und getestete Hardware





# 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 *Streifinger, E.*  
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*  
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*  
Schneiderodierte Oberflächen  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*  
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
Klipsmontage mit Industrierobotern  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*  
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*  
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*  
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*  
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wiba, P.*  
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*  
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*  
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie  
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 *Pfrang, 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 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen 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 · 86 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 *Hoßmann, J.*  
**Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*  
**Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse**  
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 *Schröder, 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 rationalen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, 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 *Glaas, W.*  
**Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
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 *Bomm, H.*  
**Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
**Qualitätssicherung 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 *Strohmayer, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56690-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, 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 *Kummelsteiner, 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 Produktionssystemen**  
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 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem 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 *Zetlmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindt, M.*  
**Auftragsleittechnik 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 *Rath, 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 *Zah, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung**  
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 Materialflußsteuerungen**  
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 *Deutsche, 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.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche 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**  
1996 · 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 *Pischelsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kähler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen 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.*  
**Steuerungintegrierte 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 *Krönert, 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 *Lindnermaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, 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 *Pfob, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgleite Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3



# Seminarberichte iw b

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

Seminarberichte iw b sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utz.de](mailto: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 3-931327-06-0
- 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 Produktionssysteme  
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
- 24 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 Dichtungs montage 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 - Produktivitätssteigerung 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 - Flexibel 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 Mikrobautteilen  
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 Mod-  
ellbildung, 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 3-89675-069-0
- 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 · Erfolgsfaktor 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 Kapsel zur aseptischen Ampulle  
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 · Schlank 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 iw b

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

Forschungsberichte iw b 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-Gunter  
**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 Fertigungszellen**  
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 Sprenzel, 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 Fahrer  
**Ganzeitliche 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 Weißberger  
**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 telepräsender 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 Breitingner  
**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 Nutzungsgrades 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 3-8316-0615-3
- 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-Griebsch  
**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 Schlickenrieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen 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 Verfabrbewegungen**  
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen**  
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch  
**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 telepräsenste 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





