

Hans Egermeier

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



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 222

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

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

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	IV
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Forschungsziel	4
1.3 Vorgehensweise und Gliederung	5
2 Stand der Technik	7
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
3	Grundlagen	33
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
4	Konzept	71
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
5	Umsetzung von Ve²	91
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
6	Anwendung und Bewertung	117
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
7	Zusammenfassung und Ausblick	149
	Literaturverzeichnis	153
A	Anhang	181
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

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 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 <i>C</i> und <i>F</i>	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 ² verwendete Software	184
A.2 Für die Umsetzung von Ve ² 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

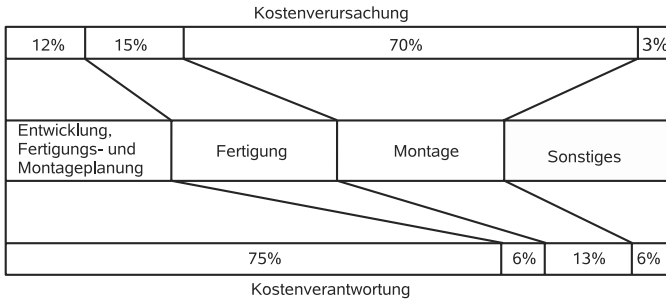


Abbildung 1.1: Kostenverantwortung und Kostenverursachung von Entwicklung, Fertigungs- und Montageplanung im Verhältnis zu der von Fertigung und Montage nach LOTTER (1992, S. 4)

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-

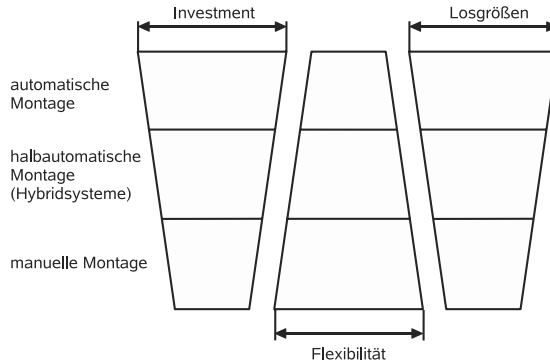


Abbildung 1.2: Der Anwendungsbereich der manuellen Montage liegt bei reduzierten Losgrößen und reduzierten Investitionskosten bei einer gleichzeitig geforderten hohen Flexibilität (LOTTER ET AL. 1998, S. 3)

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 rechnerische 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 (Ve²), 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 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 Ve^2 realisiert werden.

In *Kapitel 5* werden die Struktur und die konkrete technische Umsetzung von 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 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 Rechneinsatzes 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 Bezugskoordinatensystem“. 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-

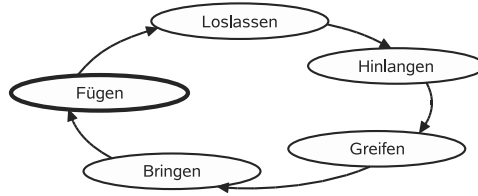


Abbildung 2.1: Einteilung der Grundbewegungen während der manuellen Montage nach dem *Methods of Time Measurement* (LOTTER ET AL. 1998, S. 14)

menzfügen (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 Kontrollvorgänge 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

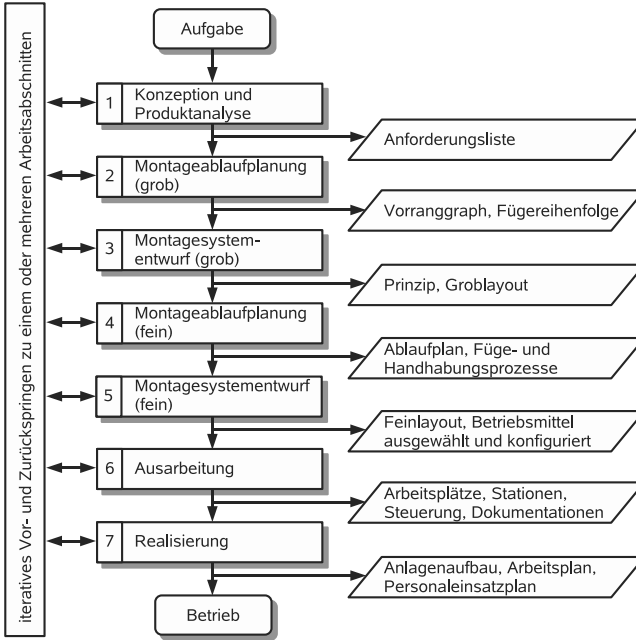


Abbildung 2.2: Prinzipielles Vorgehen bei der Montageplanung, zusammengefasst von GRUNWALD (2002, S. 33), basierend auf BULLINGER (1986), SCHUSTER (1992), LOTTER (1992) und KONOLD & REGER (1997)

(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).

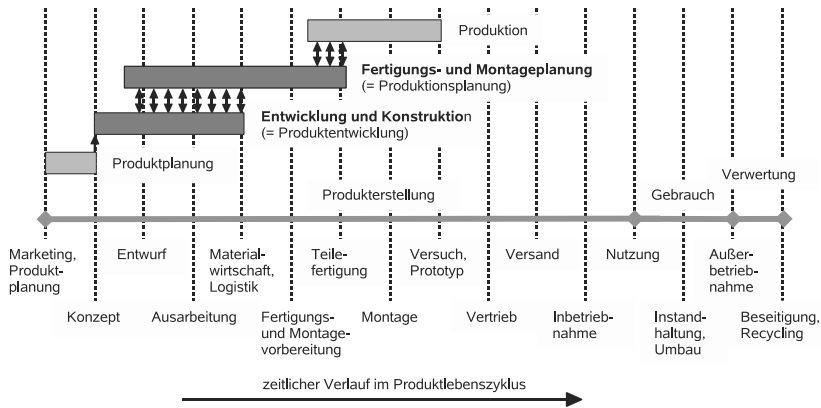


Abbildung 2.3: Parallelisierung der Produktionsplanung und damit der Montageplanung mit der Produktentwicklung in den frühen Phasen des Produktlebenszyklus nach GRUNWALD (2002, S. 6)

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

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 Physiksimulation 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

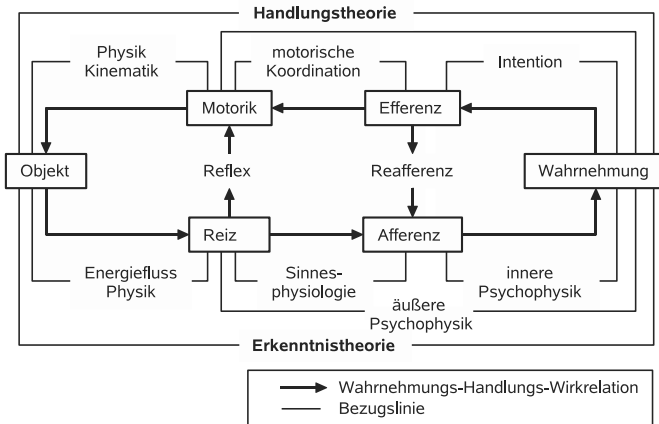


Abbildung 3.1: Wahrnehmungs-Handlungs-Kreis von STADLER (1997)

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, ca. $2,0^\circ$ am Handgelenk und am Ellenbogengelenk und ca. $0,8^\circ$ 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-

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 Vorgehenschritten 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 kraft rückkoppelnden 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 Fragestellungen wie z. B. die Erreichbarkeit lassen sich auf diese Weise ebenfalls intuitiv beantworten. Um kooperatives Arbeiten zu unterstützen, sollte das visuelle

5 Umsetzung von Ve^2

5.1 Inhalt des Kapitels

In diesem Kapitel werden die Struktur und die konkrete technische Umsetzung des speziell entwickelten VR-Systems Ve^2 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^2 zu einem gesamtheitlichen Ansatz verknüpft. Bei der Implementierung von Ve^2 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^2 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^2 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*.

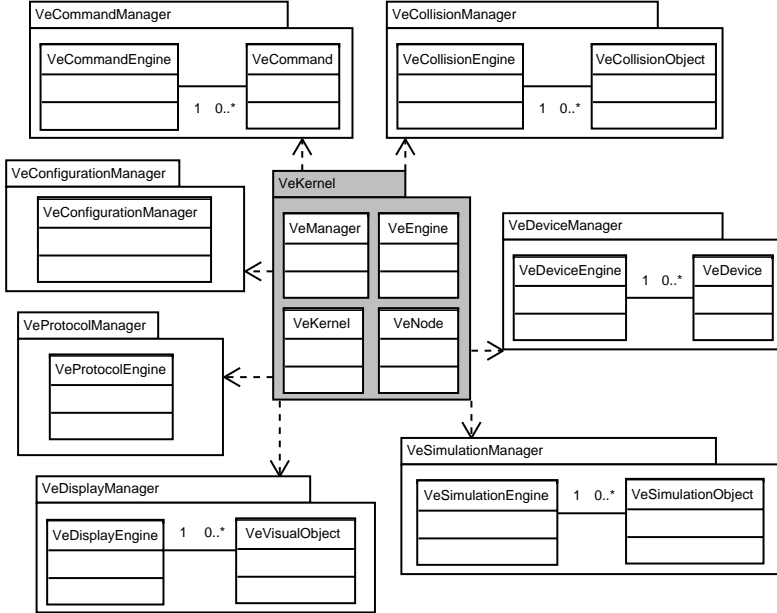


Abbildung 5.1: Grundlegende Softwarepakete und Klassen der Manager-basierten Struktur von Ve^2

Der **VeKernel** ist das zentrale Softwarepaket und fasst alle Klassen zusammen, die die funktionale Basis für Ve^2 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^2 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 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 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^2 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^2 , 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-

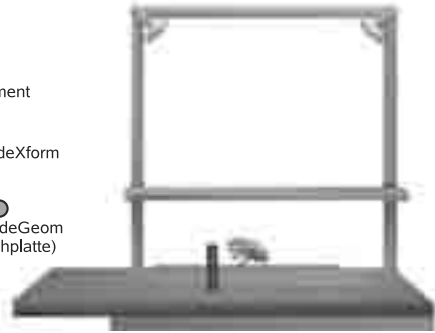
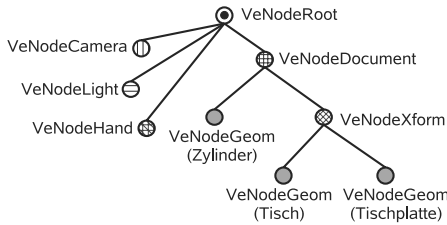


Abbildung 5.2: Beispielhafter Szenegraph in Ve^2 mit einem Tisch, einem Zylinder und einer virtuellen Hand

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 Physiksimulation 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*

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

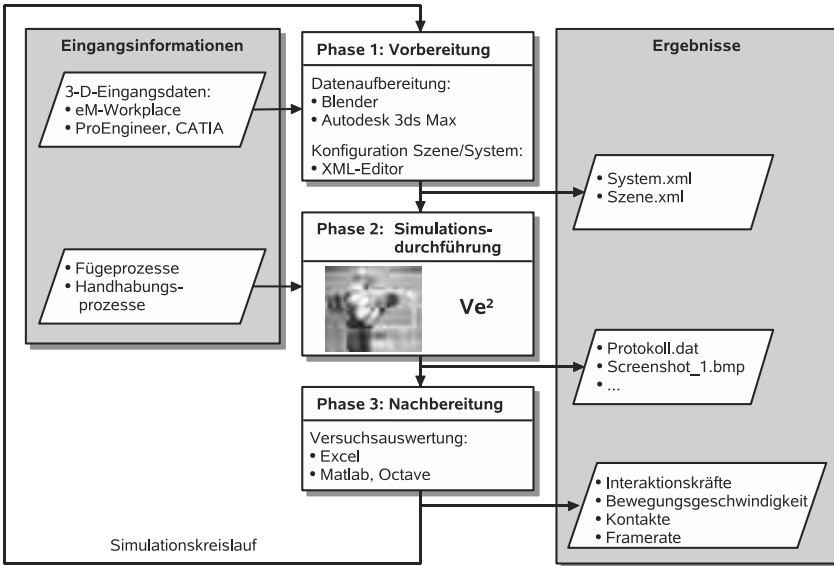


Abbildung 6.1: Ablauf der Anwendungstests von Ve^2

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 *Simulationdurchführung*, 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 CyberGraspTM. 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 CyberGraspTM 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
Kompiler & Betriebssystem		
-O3	-	höchste Optimierungsstufe des Compilers g++
-nice	-n -20	höchste Prozesspriorität bei Linuxprozessen
Aktualisierungsraten		
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 TM
Physikparameter der Umgebung		
a_y	$-9,81 \text{ m/s}^2$	Relativbeschleunigung in y-Richtung (Gravitation)
μ_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
Parameter der Hand		
F_{umax}	4,8 N	Maximale an den Benutzer zurückgekoppelte Kraft
μ_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 Ve² 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.

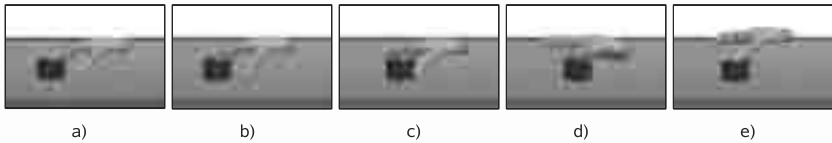


Abbildung 6.2: Bildfolge a bis e des Kontaktversuchs zur Überprüfung des in Ve^2 implementierten haptischen Renderings

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 CyberGraspTM 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,

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

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.

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 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.

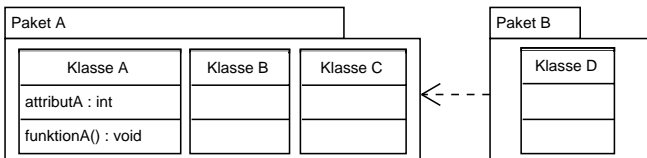


Abbildung A.1: Für Ve^2 verwendete Elemente eines UML-Klassendiagramms zur Darstellung von Softwarepaketen

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.

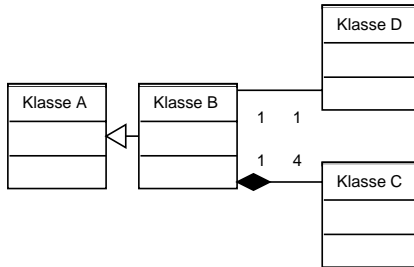


Abbildung A.2: Für Ve^2 verwendete Elemente eines UML-Klassendiagramms zur Darstellung der Beziehungen zwischen Klassen

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.

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.*
Klippsmontage 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 Montage-systeme
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 *Saverer, 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 *Wrtbe, 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 *Tuzcek, H.*
Inspektion von Karosserieteilen 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 3-540-54078-8
- 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 Programmabkastens 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 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung 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 *Bamm, 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 *Strohmayr, 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 3-540-56689-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationwerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
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 *Lindl, 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 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanger, 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
Harthbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionssystemen**
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 *Rackland, 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.*
Systemik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche 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 *Lindermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Präzeorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfäden 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.*
Erfahrungsgleitetete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

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

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

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 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 - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von 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
133 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturndynamik 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 Kapselfabrik 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 iwb

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

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

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-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 Partnerverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

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

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg 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 Schraubverbindungen 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 telepräsenster 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 Schlickerieder
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 Verfahrbewegungen
 2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
 2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
 2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
 2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die 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