

Daniel Siedl

**Simulation des dynamischen Verhaltens  
von Werkzeugmaschinen  
während Verfahrbewegungen**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 213

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 978-3-8316-0779-2

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen .....</b>	<b>VII</b>
Große lateinische Buchstaben.....	VII
Kleine lateinische Buchstaben .....	VIII
Griechische Buchstaben .....	IX
Indizes .....	X
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>Symbole .....</b>	<b>XII</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1    Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1    Allgemeines.....	1
1.2    Stand der Forschung .....	3
1.2.1    Allgemeines .....	3
1.2.2    Simulation mechanischer Bewegungen .....	3
1.2.3    Rückwirkung von Prozesskräften .....	9
1.2.4    Verknüpfung von Antriebs- und Strukturdynamik.....	11
1.3    Defizite und Handlungsbedarf .....	15
1.4    Zielsetzung und Vorgehensweise .....	18
1.5    Aufbau der Arbeit.....	20
<b>2    Grundlagen.....</b>	<b>23</b>
2.1    Inhalt des Kapitels .....	23
2.2    Konstruktion von Werkzeugmaschinen.....	23

2.2.1	Definition .....	23
2.2.2	Konstruktionsmethoden .....	24
2.2.3	Konstruktionsarten .....	29
2.2.4	Methoden für die Werkzeugmaschinenkonstruktion .....	29
2.3	Verformungsverhalten von Werkzeugmaschinen.....	33
2.3.1	Werkzeugmaschinen als nachgiebige Systeme.....	33
2.3.2	Beanspruchung von Werkzeugmaschinen.....	34
2.4	Simulationsmethoden für die Konstruktion von Werkzeugmaschinen .....	38
2.4.1	Allgemeines .....	38
2.4.2	Einbindung von Berechnungen in den Entwicklungsprozess .....	40
2.4.3	Finite-Elemente-Methode für flexible Mehrkörpersysteme ..	43
2.4.4	Mehrkörpersysteme .....	49
2.4.5	Reduktionsverfahren.....	51
<b>3</b>	<b>Konzeption .....</b>	<b>59</b>
3.1	Inhalt des Kapitels.....	59
3.2	Integration der Simulation in den Entwicklungsprozess.....	59
3.3	Synthese der Methoden FEM und MK-Simulation .....	61
3.3.1	Allgemeines .....	61
3.3.2	Simulation von Starrkörperbewegungen .....	62
3.3.3	Integration von flexiblen Körpern.....	65
3.3.4	Integration nodaler Körper.....	66
3.4	Einbindung der Regelungssimulation .....	68
3.4.1	Allgemeines .....	68

3.4.2	Co-Simulation.....	69
3.4.3	Integrierte Simulation.....	71
3.5	Vorgehensmodell für die simulative Unterstützung des Entwicklungsprozesses .....	73
3.5.1	Allgemeines .....	73
3.5.2	Kinematikmodelle.....	74
3.5.3	Hybride Maschinenmodelle.....	77
3.6	Schlussfolgerung .....	81
<b>4</b>	<b>Modellbildung und Simulation .....</b>	<b>83</b>
4.1	Inhalt des Kapitels .....	83
4.2	Modellierung von Strukturkomponenten.....	83
4.2.1	Starrkörper .....	83
4.2.2	Modal reduzierte Körper .....	85
4.2.3	Nodale Körper.....	88
4.3	Kontaktmodellierung auf flexiblen Strukturen für große Verfahrbewegungen.....	90
4.3.1	Allgemeines .....	90
4.3.2	Funktionsweise des kontinuierlichen Krafteinleitungselements.....	91
4.3.3	Untersuchung der Krafteinleitungsfunktion.....	96
4.3.4	Verifikation.....	98
4.4	Modellierung von Antriebs- und Führungskomponenten .....	102
4.4.1	Allgemeines .....	102
4.4.2	Führungsschuhe .....	102
4.4.3	Kugelgewindetriebe .....	104
4.4.4	Kupplungen und Riementriebe.....	107

4.5	Abbildung von Randbedingungen .....	109
4.5.1	Regelung und Bahnplanung.....	109
4.5.2	Modell des Zerspanprozesses .....	112
4.6	Schlussfolgerung.....	115
<b>5</b>	<b>Softwarewerkzeuge.....</b>	<b>117</b>
5.1	Inhalt des Kapitels.....	117
5.2	Anforderungen an das Simulationssystem .....	117
5.3	Umsetzung auf der Basis eines kommerziellen Werkzeugs .....	121
5.3.1	Allgemeines .....	121
5.3.2	Entwicklung von Teilmodellen.....	123
5.4	Parametrierbare Komponentendatenbank .....	126
5.5	Schlussfolgerung.....	129
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel .....</b>	<b>131</b>
6.1	Inhalt des Kapitels.....	131
6.2	Modellbildung.....	132
6.2.1	Ausgangssituation und Simulationsaufgabe .....	132
6.2.2	Kinematikmodell .....	133
6.2.3	Hybrides Maschinenmodell .....	135
6.3	Simulation und Verifikation .....	138
6.3.1	Simulation der Bearbeitungsaufgabe.....	138
6.3.2	Messtechnische Untersuchungen .....	141
6.4	Bewertung des Vorgehensmodells.....	146
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>151</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>155</b>

<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>175</b>
A	Abbildungsverzeichnis.....	175
B	Verzeichnis verwendeter Produkte.....	183
C	Technische Daten Doppelspindel-Dreh- und Fräsbearbeitungszentrum EMCO HYPERTURN 665MC <sup>plus</sup> .....	184

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Werkzeugmaschinen zählen zu den wichtigsten Komponenten der Produktionstechnik, ohne die der heutige hohe Lebensstandard der Industrienationen nicht denkbar wäre (MILBERG 1992). In der Vergangenheit lagen für die Konstruktion von Werkzeugmaschinen rein mechanische Prinzipien zugrunde. Der technische Entwicklungsstand hat sich jedoch in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert. Die Informationstechnologie hat dazu geführt, dass viele mechanische Funktionen durch Softwarelösungen substituiert und neue Produkte hervorgebracht wurden.

Eine Schlüsseltechnologie für die wettbewerbsfähige Entwicklung von Werkzeugmaschinen ist die Mechatronik. Durch die gezielte Kombination der technischen Lösungen der Fachdisziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Informatik können effiziente Systeme mit einer hohen Funktionalität entwickelt werden. Im Vordergrund steht die Ergänzung und Erweiterung mechanischer Systeme um Sensoren, Aktoren und Mikrorechner zur Realisierung leistungsfähiger Produktionssysteme.

Der Entwurf eines mechatronischen Systems erfordert eine Verknüpfung von differenziertem Fachwissen. Voraussetzung dafür ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Die Entwickler stehen somit vor der Aufgabe, Methoden in die Produktentwicklung einzubinden, die ein gemeinsames Systemverständnis ermöglichen. Dafür hat sich der Einsatz von fachübergreifenden Simulationswerkzeugen etabliert. Die Bandbreite reicht dabei von Softwarelösungen für die Auswahl und Optimierung von Einzelkomponenten bis hin zu einer Beurteilung des gesamten Systemverhaltens.

Aufgrund der Komplexität der Modelle kommen für die Simulation numerische, rechnerbasierte Verfahren zum Einsatz. Die Herausforderung für die vorliegende Arbeit liegt nun in der Weiterentwicklung dieser Simulationswerkzeuge und in ihrer kreativen Nutzung für die Analyse und Verbesserung mechatronischer Systeme. Dabei wird die Software nicht nur zur Lösung, sondern zum automatisierten Aufstellen der Systemgleichungen eingesetzt. Dies birgt aber die Gefahr, dass der Einblick in das mathematische Modell verloren geht und die Beurteilung der Ergebnisse erschwert wird. In dieser Arbeit wird deshalb der Einsatz von vorgefertigten und geprüften Modellbausteinen vorgeschlagen, um eine sichere Modellbildung zu gewährleisten.



Das Potenzial der Simulation komplexer mechatronischer Systeme muss für zukünftige Anwendungen in der Produktionstechnik ausgeschöpft werden. Aufgrund der immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen wird der traditionelle Konstruktionsprozess, basierend auf der Herstellung von realen Prototypen, zum Engpass für die effiziente Entwicklung von modernen Werkzeugmaschinen (ALTINTAS et al. 2005, ZÄH & SIEDL 2007).

Traditionelle Entwicklungsprozesse, die ohne den Einsatz von simulationsgestützten Verfahren durchgeführt werden, nutzen für die Optimierung so genannte Trial-and-Error-Verfahren<sup>1</sup> und das Erfahrungswissen der Konstrukteure. Dieses Vorgehen führt aber zu zeit- und kostenintensiven Abläufen und kann somit die Einführung innovativer mechatronischer Konzepte bremsen. Der Werkzeugmaschinenhersteller läuft Gefahr, im globalen Wettbewerb zurückzufallen. Durch die Möglichkeit, an einem Simulationsmodell sehr schnell Änderungen am Maschinenkonzept durchzuführen und mehrere Varianten in kürzerer Zeit zu untersuchen, wird der Kosten- und Zeitaufwand im Entwicklungsprozess gesenkt. Bild 1.1 zeigt schematisch die mögliche Zeiteinsparung durch den Einsatz von virtuellen Prototypen<sup>2</sup>.

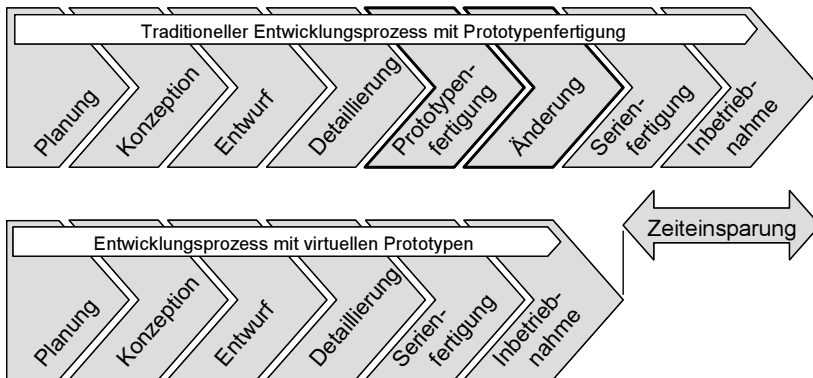


Bild 1.1: Schematische Darstellung der Einsparungsmöglichkeiten im Entwicklungsprozess durch den Einsatz von virtuellen Prototypen (in Anlehnung an EHRENSPIEL 1995 und ALTINTAS et al. 2005)

---

<sup>1</sup> Das Trial-and-Error-Verfahren ist eine heuristische Methode, um Probleme zu lösen, bei der so lange zulässige Lösungsmöglichkeiten probiert werden, bis die gewünschte Lösung gefunden wird.

<sup>2</sup> Der virtuelle Prototyp einer Werkzeugmaschine ist ein Simulationsmodell der realen Maschine, das analysiert, getestet und optimiert werden kann und Rückschlüsse auf das reale System zulässt (ALTINTAS et al. 2005).

Ein Entwicklungsprozess mit virtuellen Prototypen ermöglicht es dem Konstrukteur, die kinematischen, statischen und dynamischen Eigenschaften der Gesamtmaschine laufend zu analysieren, um einen geeigneten Entwurf zu finden. In den nächsten Jahren wird sich die Simulationstechnik zu einer wichtigen Voraussetzung für die Konstruktion von innovativen und wettbewerbsfähigen Werkzeugmaschinen entwickeln.

## 1.2 Stand der Forschung

### 1.2.1 Allgemeines

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und die Anwendung eines Werkzeugs zur Simulation eines virtuellen Prototyps. Da auf dem Gebiet der Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen umfangreiche Arbeiten vorliegen, bedarf es zunächst einer Darstellung des Standes der Forschung. Diese gliedert sich thematisch in die Simulation der Bewegungen der mechanischen Struktur und die dafür genutzten Verfahren, die Modellierung von Prozesskräften auf diese Struktur und deren Verknüpfung mit den Antriebs- und Regelungssystemen.

### 1.2.2 Simulation mechanischer Bewegungen

Für die Simulation mechanischer Bewegungen und die Erarbeitung der zugehörigen Methoden hat sich der Begriff "Computational Mechanics" etabliert, der mit dem Begriff „Computermechanik“ übersetzt wird (Bild 1.2). Aus den Methoden der klassischen Mechanik entwickelte sich infolge einer Orientierung an konkreten Anwendungen die technische Mechanik, deren Verfahren für die Computermechanik an die Arbeitsweise von Rechnersystemen angepasst wurden.

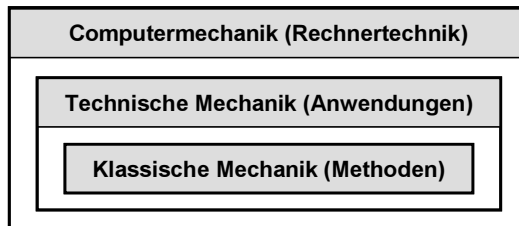


Bild 1.2: Einordnung der Computermechanik in die Geschichte der Mechanik (SCHWERTASSEK & WALLRAPP 1999)

## **2 Grundlagen**

### **2.1 Inhalt des Kapitels**

Nach der Erläuterung der Problemstellung, der Beschreibung des Standes der Technik und der daraus abgeleiteten Zielsetzung werden in diesem Kapitel die der Arbeit zugrunde liegenden Zusammenhänge erläutert und die im weiteren Verlauf der Arbeit gebrauchten Begriffe geklärt. Zunächst werden die wesentlichen Inhalte einer allgemeinen Methodik zur Konstruktion technischer Produkte beschrieben und für die Werkzeugmaschinenkonstruktion konkretisiert (Abschnitt 2.2). Danach erfolgt in Abschnitt 2.3 eine Erörterung der Wirkzusammenhänge bei statischen und dynamischen Verformungen von Werkzeugmaschinen.

In Abschnitt 2.4 liegt der Schwerpunkt auf der Simulation von Werkzeugmaschinen. Darin werden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Einbindung von Simulationsverfahren in den Entwicklungsprozess erörtert. Das Kapitel wird mit einer ausführlichen Diskussion der Finite-Elemente-Methode, der Mehrkörpersimulation und der modalen Reduktion abgeschlossen.

### **2.2 Konstruktion von Werkzeugmaschinen**

#### **2.2.1 Definition**

Die VDI-RICHTLINIE 2221 definiert den Begriff des Konstruierens als Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen die Informationen zur Erstellung und Nutzung eines Produkts erarbeitet werden. Die Tätigkeiten gehen von der Aufgabenstellung aus und enden mit der Produktdokumentation.

Das Konstruieren ist damit Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses. Darin werden alle Aktivitäten zusammengefasst, die zur Erreichung eines neuen, serienreifen Produkts erforderlich sind. Die Entwicklung endet gemäß diesem Verständnis mit der Produktionsfreigabe. Unter dem Prozess der Produkterstellung soll der Vorgang zur Erzeugung eines Produkts, von der Idee bis zur ersten Auslieferung, verstanden werden.

Nach EHRENSPIEL (1995) schließt dieser Prozess die Produktion und den Vertrieb mit ein. Konstruktion, Produktentwicklung und Produkterstellung können demnach in den Produktlebenszyklus eingeordnet werden (Bild 2.1).

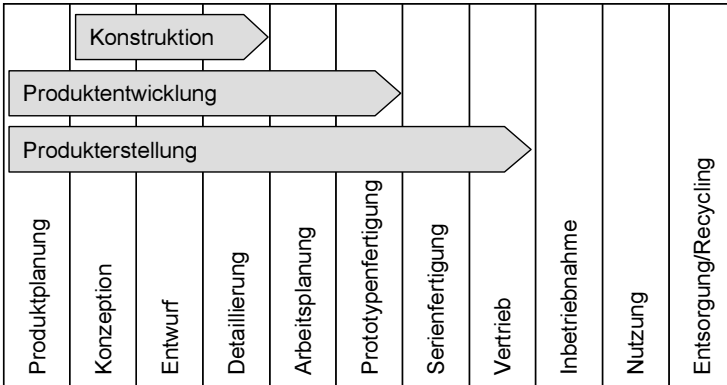


Bild 2.1: Einordnung der Phasen Konstruktion, Produktentwicklung und Produkterstellung in den Produktlebenszyklus (EHRENSPIEL 1995)

Die Begriffe *Konstruktion* und *Entwicklung* werden oft synonym gebraucht. Die Entwicklung ist der Konstruktion jedoch organisatorisch übergeordnet und umfasst zusätzlich die Abteilungen Versuch, Musterbau und Berechnung sowie die Stabsstellen Normung, CAD-Betreuung (Computer Aided Design), Patentwesen und Wertanalyse (EHRENSPIEL 1995).

### 2.2.2 Konstruktionsmethoden

Konstruktionsmethoden beschreiben Vorgehensweisen, die eine effiziente Erarbeitung qualitativ hochwertiger und wirtschaftlicher Produkte sowie die Integration der Datenverarbeitung in den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess ermöglichen. In der VDI-RICHTLINIE 2221 wurden die Erkenntnisse zu einer allgemeingültigen Methodik bezogen auf das Entwickeln und Konstruieren zusammengefasst. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Methoden finden sich u. a. bei ROTH (1982), HUBKA (1984), RODENACKER (1984), EHRENSPIEL et al. (1998), KOLLER (1994) und LINDEMANN (1999).

Die Systemtechnik bildet eine wesentliche Grundlage der Konstruktionsmethodik. Das Vorgehensmodell nach der VDI-RICHTLINIE 2221 basiert nach HABERFELLNER et al. (1997) auf folgenden Grundgedanken:

- Dem Top-Down-Prinzip, d. h. einer Betrachtung des Systems auf verschiedenen Ebenen,
- dem Prinzip der Variantenbildung,
- der Gliederung der Lösungsfindung in einen Phasenablauf und
- dem Vorgehen nach einem allgemeingültigen, phasenunabhängigen Leitfaden.

Das in der Praxis bewährte Top-Down-Prinzip unterteilt ein komplexes Gesamtproblem zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in erkennbare Teilprobleme. Gemäß Bild 2.2 wird diese Aufgliederung solange wiederholt, bis die Teilprobleme einen handhabbaren Komplexitätsgrad erreicht haben, einzeln gelöst und die Einzellösungen anschließend zu einer Gesamtlösung verknüpft werden können.

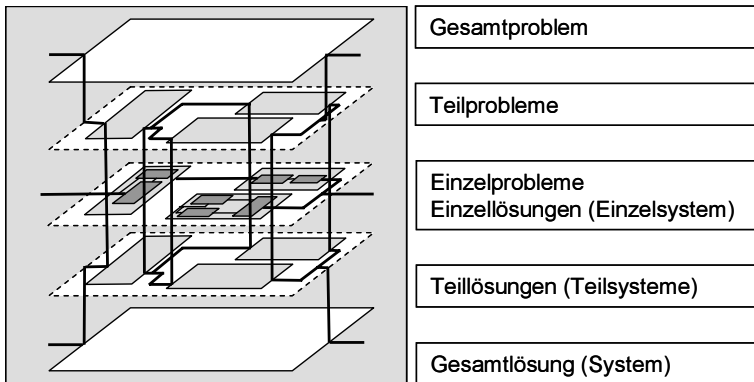


Bild 2.2: Methode der Aufgliederung und anschließenden Verknüpfung von Teilsystemen zur Problem- und Systemstrukturierung (VDI-RICHTLINIE 2221)

Zunächst erfolgt die Festlegung der grundlegenden Zusammenhänge in einer prinzipiellen Lösung. Die weiteren Details werden in einem realisierbaren Entwurf festgelegt.

Die VDI-RICHTLINIE 2221 unterteilt den Lebenszyklus eines technischen Produkts in die Lebensphasen Programmstudie, Systemvorstudie, Systementwicklung, Systemherstellung, Systemeinführung, Systembetrieb und Systemwechsel. Für alle Lebensphasen

kann dabei die gleiche Problemlösungsstrategie, die durch die Abfolge der Arbeitsschritte Problemanalyse, Problemformulierung, Systemsynthese, Systemanalyse, Beurteilung und Entscheidung gekennzeichnet ist, angewendet werden. Da bei der Entwicklung komplexer Systeme die einfache Aneinanderreihung der einzelnen Vorgehensschritte aber nicht zur Lösungsfindung ausreicht, müssen die Problemlösungsschritte z. T. in mehrfachen Wiederholungszyklen durchlaufen werden (Bild 2.3).

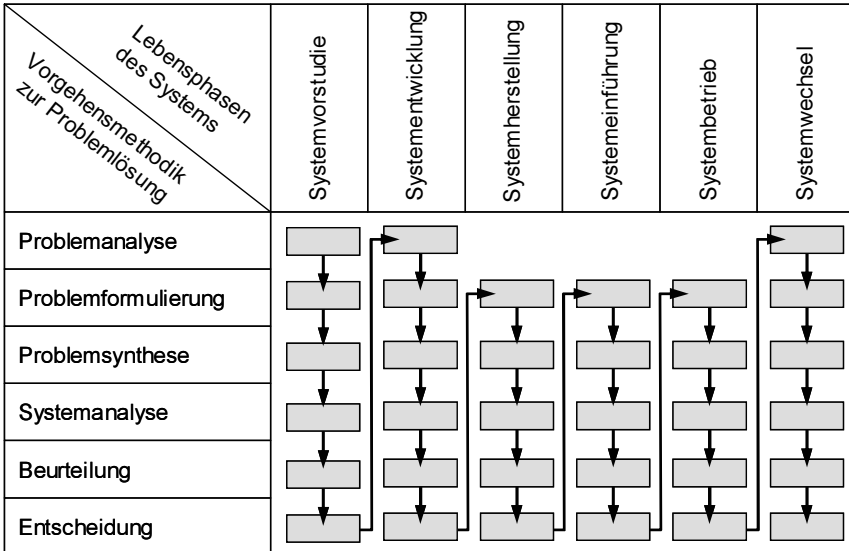


Bild 2.3: Systemtechnisches Vorgehensmodell und Problemlösungszyklen für die unterschiedlichen Lebensphasen der Systementwicklung (VDI-RICHTLINIE 2221)

In Anlehnung an diese Problemlösungsstrategie der Systemtechnik wird in der VDI-RICHTLINIE 2221 ein generelles, branchenübergreifendes Vorgehen zur Entwicklung und Konstruktion technischer Produkte vorgeschlagen. Nach Bild 2.4 umfasst dieser Vorgehensplan sieben Arbeitsabschnitte.

Konstruktionsphasen	Aufgabe	Arbeits- ergebnisse
Konzipieren	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Anforderungsliste
	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	Funktionsstrukturen
Entwerfen	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	Prinzipielle Lösungen
	Gliedern in realisierbare Module	Modulare Strukturen
	Gestalten der maßgebenden Module	Vorentwürfe
Ausarbeiten	Gestalten des gesamten Produktes	Gesamtentwurf
	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Produktdokumentation
	Realisierung	

Bild 2.4: *Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren*  
(VDI-RICHTLINIE 2210, PAHL et al. 1993)

Aufgrund der immer stärker werdenden Funktionsintegration bei mechatronischen Produkten müssen die Entwicklungsprozesse der verschiedenen Fachbereiche ineinander greifen. Der Entwurf mechatronischer Systeme erfordert ein hohes Maß an Kommunikation zwischen den Konstrukteuren verschiedener Fachrichtungen.

Um den gestiegenen Anforderungen an die Konstruktion von mechatronischen Systemen gerecht zu werden, wurde die VDI-RICHTLINIE 2206 erarbeitet. Sie sieht zur Abstimmung zunächst einen interdisziplinären Systementwurf vor (Bild 2.5). Dabei werden die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen beschrieben. Die darauf folgende Zerlegung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen bildet die Grundlage für die domänenspezifischen Entwürfe. Danach werden diese Einzellösungen zu einem Gesamtsystem zusammengefügt. Der Abgleich der Konzepte mit dem Systementwurf findet während der Systemintegration statt.

## **3 Konzeption**

### **3.1 Inhalt des Kapitels**

In diesem Kapitel wird das Konzept für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen beschrieben. Gemeinsam mit Kapitel 4 bildet es den theoretischen Kern dieser Arbeit. Im Sinne der Zielsetzung werden die Grundlagen und Methoden aus Kapitel 2 ergänzt und weiterentwickelt.

Abschnitt 3.2 beschäftigt sich mit dem Nutzen einer vollständigen Integration der Simulation in den Produktentstehungsprozess. In diesem Zusammenhang wird der Bedarf für eine konstruktionsbegleitende Simulationsumgebung im Bereich der Werkzeugmaschinen aufgezeigt und im Anschluss an die vorgestellte Entwicklungsmethodik in Abschnitt 3.3 die Synthese der Methoden FEM und MK-Simulation in einem Modell auf der Ebene der modellbeschreibenden Gleichungen dargestellt. Die Kombination von starren Mehrkörpersystemen und nicht reduzierten Finite-Elemente-Modellen für Werkzeugmaschinen wird in dieser Arbeit erstmals angewendet und ist die Grundlage für die Simulation von großen Verfahrbewegungen. Abschnitt 3.4 behandelt die Eigenschaften der Regelung im Gesamtmodell, die wesentlicher Bestandteil des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine ist.

Nach den theoretischen Betrachtungen der notwendigen Simulationsbausteine befasst sich der letzte Abschnitt dieses Kapitels mit der effizienten Einbindung der Simulation in die Produktentwicklung. Die einzelnen Bausteine werden in ein umfangreiches Vorgehensmodell für die simulative Unterstützung des gesamten Entwicklungsprozesses eingebettet.

### **3.2 Integration der Simulation in den Entwicklungsprozess**

Nahezu alle Industriebereiche begannen in den späten neunziger Jahren mit der Einführung von 3D-CAD-Systemen in der Produktentwicklung. Dies hat zu entscheidenden Zeit- und Kosteneinsparungen in der Konstruktion geführt und bildet die Grundlage für die Einführung von Simulationssystemen, die auf den 3D-Modellen der Struktur aufbauen.

Erst das optimale Zusammenspiel der unterschiedlichen Abteilungen erlaubt es, alle Potenziale der Simulationswerkzeuge auszuschöpfen. In vielen Unternehmen sind die



Abteilungen nicht eng genug miteinander verbunden. Häufig wird erst am realen Prototyp untersucht, ob die Konstruktion den zu Beginn der Entwicklung gestellten Anforderungen entspricht. Als Folge davon müssen bei unzureichenden Versuchsergebnissen in vielen Fällen einige Bauteile oder gar die gesamte Konstruktion überarbeitet werden. Auf diese Weise gehen wertvolle Ressourcen verloren, die an anderer Stelle im Entwicklungsprozess gewinnbringender eingesetzt oder eingespart werden könnten. Der Einsatz von Methoden zur Eigenschaftsabsicherung in den frühen Phasen der Entwicklung ermöglicht es, diesen Zeitverlust zu verhindern. Dieser Prozess wird als Frontloading<sup>1</sup> bezeichnet (Bild 3.1).

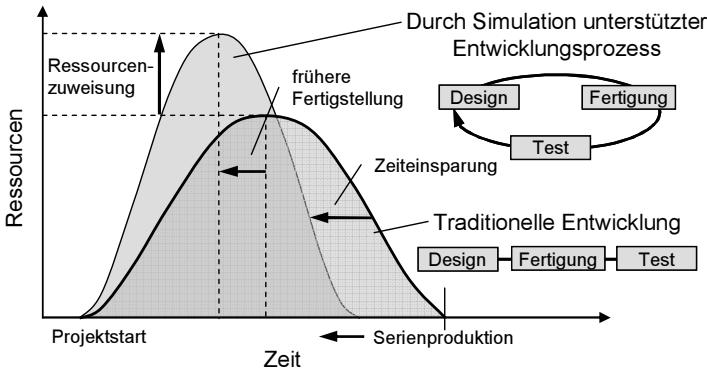


Bild 3.1: Verlagerungen von Ressourcen in die frühe Entwicklungsphase und die damit verbundene Vorverlegung der Serienproduktion (KRAUSE et al. 2002)

Wichtige Konstruktionsentscheidungen sollten bereits in einer möglichst frühen Phase des Entwicklungsprozesses abgesichert werden. Um dies zu erreichen, sind die Simulationen und Analysen in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen aufeinander abzustimmen (vgl. Abschnitt 2.2.4). Idealerweise haben die Konstrukteure in jeder Phase des Prozesses die Möglichkeit zu überprüfen, ob ein Konzept den Anforderungen entspricht, um bei Bedarf sofort Anpassungen und Änderungen vornehmen zu können. Diese Randbedingungen stellen bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen besondere Anforderungen an das Simulationsmodell: Wie bei allen Simulationen müssen auch bei Produktionssystemen experimentierfähige Modelle mit einer hinrei-

<sup>1</sup> Frontloading bezeichnet im Rahmen der Produktentwicklung die Integration von Simulation und Analyse in der frühen Konzeptphase eines neuen Produkts.

chend genauen Abbildung der Realität entstehen. Die Rechenzeiten sollen dabei möglichst kurz sein, um eine hohe Anzahl an Iterationen zu ermöglichen.

Kleine Stückzahlen in der Werkzeugmaschinenindustrie geben den Ingenieuren kaum die Möglichkeit, Berechnungsmodelle anhand von Messungen abzugleichen und einen notwendigen Erfahrungsschatz für die Simulation aufzubauen. Ohne einen laufenden Abgleich ist aber das eigentliche Ziel der Eigenschaftsfrüherkennung nur schwer erreichbar. In Abschnitt 3.5 wird dafür eine Lösungsmöglichkeit vorgestellt. Das Vorgehensmodell basiert auf vormodellierten und getesteten Teilmodellen. Sie bilden die Bausteine, aus denen das Gesamtmodell der Maschine zusammengesetzt wird.

Neben den Analysemöglichkeiten des fertigen Simulationsmodells spielt auch die Modellierung eine wichtige Rolle. Das Modell muss sich schnell aus den jeweils zur Verfügung stehenden Konstruktionsdaten erstellen lassen, es sollte sozusagen in der Produktentwicklung „mitwachsen“. Wie die anderen Konstruktionsdaten wird auch das Modell zunehmend detailliert. Dies ist aber nur möglich, wenn alle Analysen während der Entwicklung auf einer Simulationsplattform durchgeführt werden können und kein ständiger Wechsel zwischen den Werkzeugen erforderlich ist. Diese Forderung steht im Gegensatz zu einem Grundsatz der Modellbildung und Simulation, der besagt, dass jedes Modell speziell auf den jeweiligen Zweck zugeschnitten sein sollte und keine unnötigen Daten enthalten sollte. Aus diesem Grund muss bei durchgängigen Modellen ein Kompromiss zwischen effizienter Modellierung und spezialisierter Simulation gefunden werden.

In Abschnitt 3.5 wird dafür ein Lösungskonzept vorgestellt, bei dem das Modell während des Entwicklungsprozesses unterschiedliche Stadien der Komplexität durchläuft und sich den wechselnden Anforderungen anpasst. Die Verifikation der Modelle und der Datenrückfluss aus experimentellen Untersuchungen am Prototyp sind weitere wichtige Bestandteile dieser Methode. Doch zunächst erfolgt die Erläuterung eines weiteren methodischen Bausteins dieser Arbeit.

### **3.3 Synthese der Methoden FEM und MK-Simulation**

#### **3.3.1 Allgemeines**

In Abschnitt 3.2 wurden die Gründe für den Einsatz einer durchgängigen Simulationsplattform für die Entwicklung von Werkzeugmaschinen beschrieben. Eine wesentliche Anforderung an das Simulationswerkzeug besteht darin, den gesamten Prozess vom

ersten Entwurf bis zum fertigen Gesamtmodell zu unterstützen. Einige Hersteller von Softwarewerkzeugen vertreiben bereits solche durchgängigen Simulationsketten. Bei den meisten Konzepten handelt es sich jedoch um eine grafische Bedienoberfläche, die einzelne, voneinander unabhängige Simulationswerkzeuge steuert. Die Integration beschränkt sich dabei auf die Anpassung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Werkzeugen. Eine echte Integration unterschiedlicher Simulationsarten in ein Modell kann aber nur auf der Ebene der modellbeschreibenden Gleichungen erfolgen. Für die durchgängige Simulation von Werkzeugmaschinen und Produktionssystemen ist es erforderlich, starre Mehrkörpersysteme mit Finite-Elemente-Modellen zu kombinieren da die Verfahrbewegungen der translatorischen Achsen um ein Vielfaches größer sind als die Deformationen der Struktur (vgl. Abschnitt 1.3). Die Mehrkörpersimulation wird für Konzeptstudien und für die Simulation von großen Verfahrbewegungen eingesetzt. Der Anwendungsbereich der FEM umfasst dabei die Analyse des statischen und dynamischen Verformungsverhaltens von Komponenten. Bild 3.2 zeigt schematisch die Integration der unterschiedlichen Freiheitsgrade in ein Gleichungssystem.

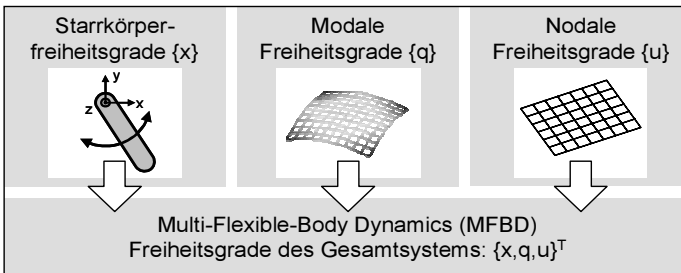


Bild 3.2: Integration von Starrkörperfreiheitsgraden, modalen und nodalen<sup>1</sup> Freiheitsgraden in ein Gesamtsystem

#### 3.3.2 Simulation von Starrkörperbewegungen

Die Simulationstechnologie für Starrkörperbewegungen bildet die Basis der Synthese der Methoden FEM und MK-Simulation. Dafür haben sich zwei Wege etabliert, die Koordinaten der Körper in der Mehrkörpersimulation darzustellen (Bild 3.3).

<sup>1</sup> Nodale Körper beschreiben Strukturkomponenten mit den vollen FE-Freiheitsgraden, die im Mehrkörpersystem während der Simulation berechnet werden.

## **4 Modellbildung und Simulation**

### **4.1 Inhalt des Kapitels**

Im vorangegangenen Kapitel wurden durch die Integration der Methoden FEM und MK-Simulation neue Möglichkeiten für die Simulation von großen Verfahrbewegungen beschrieben. Im Rahmen dieses Kapitels werden dafür innovative Methoden der Modellbildung aufgezeigt. In Abschnitt 4.2 folgt die Erläuterung der unterschiedlichen Modellierungsvarianten für Strukturbauteile. Dabei werden die Erstellung und der Einsatz von starren und flexiblen Körpern im Entwicklungsprozess diskutiert. Der Schwerpunkt des Kapitels liegt auf der Beschreibung der Kontaktmodellierung für große Verfahrbewegungen. Die Funktionsweise wird in Abschnitt 4.3 detailliert erörtert und anhand eines Beispiels verifiziert. Die Methode kommt anschließend für die Modellierung von Antriebs- und Führungskomponenten zum Einsatz. Eine konkrete Umsetzung erfolgt dabei für Führungsschuhe, Gewindetribe, Kupplungen und Riementriebe. Nach der Beschreibung der mechanischen Modellkomponenten wird in Abschnitt 4.5 die Modellierung von Randbedingungen des Mehrkörpermodells erläutert. Die Bahnplanung und die Antriebsregelung bilden dabei die Eingangsgrößen für die Vorschubantriebe. An der Wirkstelle der Werkzeugmaschine bzw. des Mehrkörpermodells, d. h. zwischen Werkzeug und Werkstück, wird ein Prozessmodell implementiert.

### **4.2 Modellierung von Strukturkomponenten**

#### **4.2.1 Starrkörper**

Ein Starrkörper wird anhand der geometrischen Abmessungen, der Materialeigenschaften, der Masse und der Trägheitseigenschaften definiert (Bild 4.1). Diese Eigenschaften dienen als Grundlage für die Erstellung der Bewegungsgleichungen des Körpers. Zudem werden die auf den Starrkörper einwirkenden Kräfte und seine Geschwindigkeit berücksichtigt. Mit diesen Informationen lassen sich die durch innere und äußere Einflüsse entstehenden translatorischen und rotatorischen Bewegungen berechnen, sofern nicht bestimmte Zwangsbedingungen, wie beispielsweise Gelenke, gewisse Freiheitsgrade festlegen. Zusätzlich können zwischen Starrkörpern auch Kontaktbedingungen, wie beispielsweise Reibung, modelliert werden.


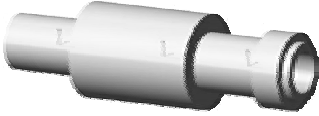
<b>Starrkörper</b>	<b>Symbol</b>		<b>Beispiel:</b> Spindel  
<b>Modelltyp</b>	<b>Komponententyp</b>		
Kinematikmodelle	Alle Strukturkomponenten		
Hybride Modelle	Strukturkomponenten, die nicht im Kraftfluss liegen, bzw. keinen Einfluss auf die Steifigkeit haben		

Bild 4.1: Einsatzbereiche für Starrkörper und deren Anwendung in unterschiedlichen Modelltypen

Ein Starrkörper ist nicht verformbar. Aus diesem Grund liegen nach der Berechnung lediglich Informationen über seine Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung vor, nicht jedoch über die Auswirkungen einer äußeren Kraft auf die Struktur des Körpers. Der Vorzug eines Starrkörpers liegt in der geringen Anzahl von Freiheitsgraden, was sich positiv auf die Berechnungszeit auswirkt. Ein starrer Körper bzw. die Kombination aus mehreren Starrkörpern eignet sich deshalb besonders für die Simulation der kinematischen Maschineneigenschaften. Bild 4.2 veranschaulicht die unterschiedlichen Wege, um einen Starrkörper zu erstellen.

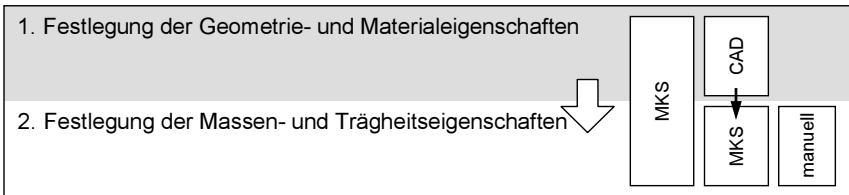


Bild 4.2: Drei Vorgehensweisen für die Erstellung von Starrkörpern in Mehrkörpersimulationssystemen

Ein Starrkörper lässt sich am einfachsten direkt im Mehrkörpersimulationsprogramm modellieren. MK-Programme bieten meist eine komfortable Oberfläche zur Konstruktion verschiedener geometrischer Körper. Aus den Geometrieinformationen und den Materialeigenschaften werden im Simulationssystem die Massen- und Trägheitseigenschaften berechnet. Der Einsatz dieser einfachen geometrischen Körper ist für den schnellen Aufbau eines einfachen Mehrkörpermodells zur Untersuchung grundlegender Sachverhalte zweckmäßig. Zudem besteht die Möglichkeit, die Massen- und Trägheitseigenschaften eines Körpers für die Modellierung manuell einzugeben. Des

Weiteren kann ein Starrkörper durch den Import einer Geometrie aus einem CAD-System erzeugt werden. Dazu wird die Komponente aus dem CAD-Programm exportiert und unverändert in das Simulationsprogramm mit allen zugewiesenen Eigenschaften importiert. Dieser Körper besitzt danach alle erforderlichen Massen- und Trägheitseigenschaften der Komponente. Als Beispiele für starre Körper, die im Modell der Werkzeugmaschine zum Einsatz kommen, können Motorwellen und weitere Komponenten mit sehr kleinen Verformungen während des Maschinenbetriebs angeführt werden (Bild 4.1). Im Hinblick auf eine spätere Modellierung der Lagerung dieser Komponenten werden an den entsprechenden Koordinaten Marker<sup>1</sup> gesetzt, um die Positionierung beim Zusammenbau zu erleichtern.

#### 4.2.2 Modal reduzierte Körper

Ein modaler oder modal reduzierter Körper besteht, wie bereits in Abschnitt 2.4.5 behandelt, aus einer bzw. aus mehreren zu einem System verbundenen Komponenten, die in ihren Freiheitsgraden stark reduziert sind (Bild 4.3). Durch die Kombination verschiedener Eigenmoden ist es möglich, Verformungen der Komponenten darzustellen und sie als flexible Körper in das Mehrkörpermodell zu integrieren.

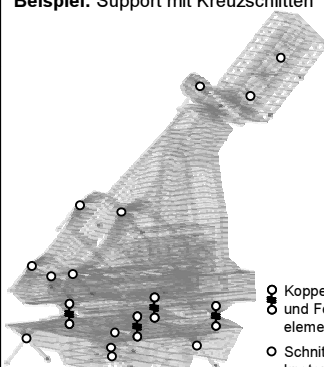
Modal reduzierte Körper		Symbol	Beispiel: Support mit Kreuzschlitten
Modelltyp	Komponententyp		
Kinematikmodelle	--		
Hybride Modelle	Nachgiebige Strukturkomponenten, auf denen keine Verfahrbewegung stattfindet		
			 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Koppelpunkte und Feder-elemente</li> <li>○ Schnittstellenknoten</li> </ul>

Bild 4.3: Einsatzbereiche für modal reduzierte Körper und deren Anwendung in unterschiedlichen Modelltypen

Ein modaler Körper besitzt – analog zu Starrkörpern – eine bestimmte Masse mit der entsprechenden Verteilung und daraus resultierend ein bestimmtes Trägheitsmoment.

<sup>1</sup> Bezeichnung eines lokalen Koordinatensystems im Mehrkörpersystem

Der Vorteil einer Anwendung modaler Körper gegenüber nodalen Körpern besteht in der Möglichkeit, flexible Strukturkomponenten mit einer geringen Anzahl an Freiheitsgraden zu modellieren. Diese Reduktionsmethode eignet sich somit für die Abbildung von flexiblen Komponenten einer Werkzeugmaschine, die während der Bearbeitung im Kraftfluss liegen und auf denen keine Verfahrbewegung stattfindet. Die dabei auftretenden Verformungen werden durch die Kombination der berechneten Eigen- und Korrekturmoden approximiert (vgl. Abschnitt 2.4.5). Um einen modalen Körper für MKS zu erhalten, sind die Schritte, wie in Bild 4.4 dargestellt, zu durchlaufen.

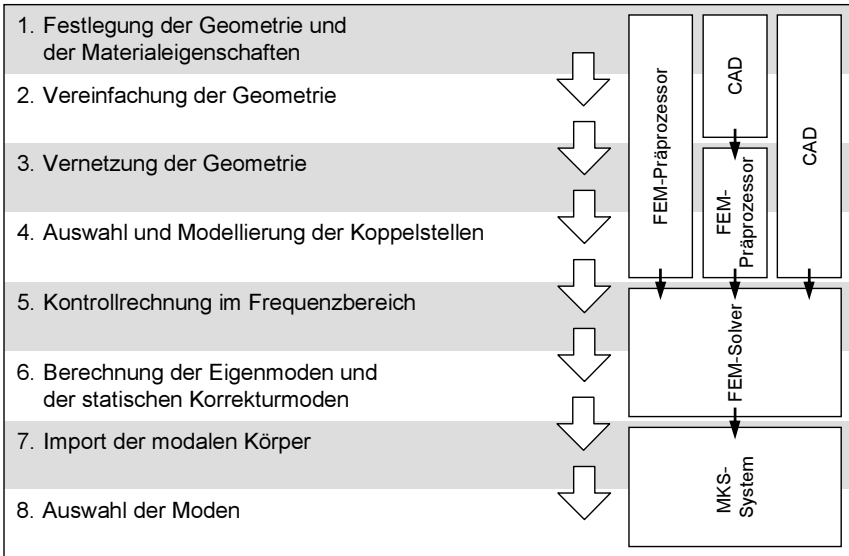


Bild 4.4: Unterschiedliche Wege für die Erstellung modal reduzierter Körper in modernen Mehrkörpersystemen

Zu Beginn werden die Geometrie und die Materialeigenschaften des Körpers festgelegt. In der Regel wird die Geometrie für die Modellbildung vereinfacht und die für die Strukturuntersuchungen unwesentlichen Details vernachlässigt. Im Anschluss daran erfolgen die Vernetzung dieser Bauteile und die Modellierung der Koppelstellen. Der fünfte Schritt dient der Überprüfung der Schritte eins bis vier. Durch die Analyse der Eigenfrequenzen jedes Körpers kann die richtige Modellierung sichergestellt werden. Die modale Reduktion beginnt mit der Berechnung der Eigenmoden und der statischen Korrekturmoden. Danach werden der modal reduzierte Körper in das

MK-System importiert und die für die Berechnung zu berücksichtigenden Moden ausgewählt. Zuletzt kann die flexible Komponente ins Mehrkörpermodell eingebaut und simuliert werden.

Für die Durchführung der ersten vier Schritte, die analog für jede FE-Berechnung durchlaufen werden müssen, gibt es mehrere Varianten. Die Konstruktion des Körpers, einschließlich der Vereinfachung der Geometrie, der Vernetzung und der anschließenden Vorbereitung der Koppelstellen, kann im FE-Präprozessor durchgeführt werden. Ein Nachteil hierbei ist, dass die Oberfläche der meisten Präprozessoren nicht für die Konstruktion von Bauteilen ausgerichtet ist. Infolge der damit verbundenen Einschränkungen wird die Konstruktion überwiegend in einem CAD-System durchgeführt und das Modell anschließend für die Vernetzung in den Präprozessor importiert. Dabei ist bereits in der Konstruktionsphase auf die spätere Vernetzung zu achten.

Eine modal reduzierte Baugruppe ist in Bild 4.3 aufgeführt. Die beiden Komponenten sind über eine Linearführung gelagert. Die translatorische Vorschubbewegung erfolgt über einen Kugelgewindtrieb. Im Modell werden die beiden Körper in ihren Koppelpunkten durch Federelemente miteinander verbunden. Mit Hilfe der modalen Reduktion ist es möglich, mehrere zu einer Baugruppe gehörende Körper zu einer Komponente zu verbinden. Eine Änderung der Steifigkeiten ist nach dem Import in das MK-System allerdings nicht mehr durchführbar. Als Schnittstellen zu anderen Körpern oder als Angriffspunkte für äußere Kräfte können bei einem modalen Körper im MK-System lediglich diejenigen Punkte herangezogen werden, die vor der eigentlichen Reduktion eigens dafür selektiert wurden. Der Grund hierfür liegt in der mathematischen Kondensation der Massen- und Steifigkeitsmatrizen auf bestimmte, vor der Reduktion festgelegte Knoten (vgl. Abschnitt 2.4.5). Nach der Reduktion ist ein Zugriff auf die unberücksichtigten Knoten nicht mehr möglich. Aus diesem Grund sind die Schnittstellenknoten sorgfältig auszuwählen, da für jeden einzelnen die Berechnung von statischen Korrekturmoden erforderlich ist. Die für das Mehrkörpermodell der Werkzeugmaschine reduzierte Baugruppe in Bild 4.3 besitzt mehrere Schnittstellenknoten. Acht dieser Knoten verbinden die Baugruppe mit den Führungen auf dem Maschinenbett und mit dem Fräskopf. Fünf weitere Knoten dienen als Lagerpunkte für die Kugelgewindtriebe und die Welle des Antriebsmotors.

Bei der modalen Reduktion können verschiedene Finite-Elemente-Strukturen, wie z. B. die Antriebseinheiten oder der Kugelgewindtrieb zu einer Baugruppe kombiniert und gemeinsam reduziert werden. Dabei lässt sich die Anzahl der Freiheitsgrade



## 5 Softwarewerkzeuge

### 5.1 Inhalt des Kapitels

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der in Kapitel 3 und 4 vorgestellten Simulations- und Modellbildungsmethoden in einem kommerziellen Softwarewerkzeug beschrieben. Dabei soll die in der Zielsetzung (Kapitel 1) geforderte Simulationsplattform für die Entwicklung von Werkzeugmaschinen verwirklicht werden.

Der nächste Abschnitt befasst sich mit den Anforderungen, die an ein Simulationssystem gestellt werden und vergleicht die Funktionen der am Markt verfügbaren Werkzeuge. Im Anschluss daran wird ein System für den Aufbau der Simulationsplattform ausgewählt. Im zweiten Abschnitt folgen eine Beschreibung der strategischen Partnerschaft und die Aufgabenteilung mit einem Softwarehersteller für die nachhaltige Umsetzung der Simulationsplattform. Anhand des Beispiels der Modellbildung eines Kugelgewindetribs (Abschnitt 4.4.3) wird die Einbettung in das Simulationssystem Schritt für Schritt erläutert. Der letzte Abschnitt beschreibt die parametrierbare Modelldatenbank (MachineTools/Toolkit), in der die vorgefertigten Modellkomponenten abgelegt sind.

### 5.2 Anforderungen an das Simulationssystem

In Abschnitt 1.3 wurde der Handlungsbedarf in Bezug auf die Entwicklung einer Simulationsplattform für Produktionssysteme aufgezeigt. Die wesentlichen Anforderungen an das Simulationssystem sind die

- Berechnung von großen Verbahrbewegungen auf flexiblen Körpern und die
- Bereitstellung von vorgefertigten und getesteten Modellkomponenten.

Die WZM-Industrie stellt eine weitere Anforderung an ein Simulationssystem. Die Bandbreite der produzierten Stückzahlen reicht von einer kundenspezifischen Einzelfertigung, z. B. Maschinen und Anlagen, bis hin zur Serienfertigung, bei der die Produkte in hoher Stückzahl unverändert produziert werden. Daraus ergibt sich der folgende Widerspruch: Bei der Stückzahl eins hat die Simulation einen sehr hohen Stellenwert, zumal die Maschine nur ein Mal gebaut wird und sozusagen der Prototyp schon direkt beim Kunden steht (Bild 5.1).

Auftretende Fehler schaden dem Image des Herstellers und sind oft mit hohen Kosten verbunden. Der Datenrückfluss in die Simulation ist bei einer solchen Fertigung nur eingeschränkt möglich, da auf den Bau von Prototypen und davon abgeleiteten Varianten verzichtet wird. Die Verifikation der Simulation und der daraus entstandenen Verbesserungsvorschläge ist somit erschwert.

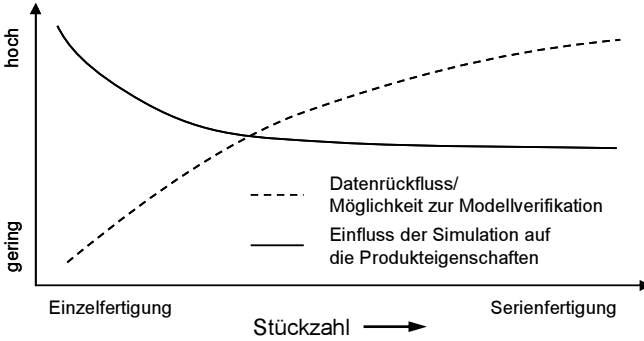


Bild 5.1: Änderung der Randbedingungen für die Simulation von Werkzeugmaschinen in Abhängigkeit von der produzierten Stückzahl

Im Gegensatz dazu stehen im Rahmen der Serienfertigung überwiegend Daten aus experimentellen Untersuchungen zur Verfügung. Gleichzeitig sinkt der Einfluss der Simulation auf die Produkteigenschaften, da Verbesserungspotenzial aus den Erfahrungen mit realen Prototypen oder gar den im Einsatz befindlichen Produkten abgeleitet werden kann. Bei der Erstellung der Simulationsplattform ist dieser Widerspruch zu berücksichtigen. Die Software muss eine große Bandbreite an Voraussetzungen erfüllen, um eine erfolgreiche Berechnung einer virtuellen Werkzeugmaschine zu gewährleisten. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

Eine wichtige technologische Voraussetzung der Simulationssoftware ist die Möglichkeit der Synthese der Methoden FEM und MK-Simulation in einem System (Bild 5.2).

Ursprünglich wurden MKS-Werkzeuge für die Berechnung von starren Mehrkörpermodellen entwickelt (vgl. Abschnitt 1.2.2). Das Einsatzgebiet beschränkte sich auf die Systembetrachtung bei Maschinen und Fahrzeugen. Eine Integration modal reduzierter Körper ermöglicht es, flexible Körper in das Simulationsmodell einzubeziehen. Folglich können beispielsweise die Fahrwerksteile in der Fahrzeugkonstruktion abgebildet werden.

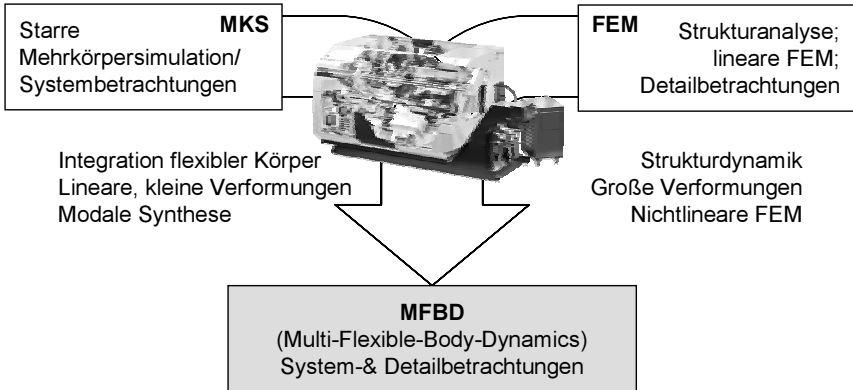


Bild 5.2: Integration von MKS und FEM zu einem Gesamtsimulationssystem

Die FEM hatte ihren Ursprung in der Strukturanalyse von Bauteilen. Mit ihr war es erstmals möglich, Detailbetrachtungen an Einzelkomponenten durchzuführen. Die FEM wurde ebenso wie die MKS weiterentwickelt, um Problemstellungen auf dem Gebiet der Strukturdynamik zu lösen (vgl. Abschnitt 1.2.2). Selbst große Verformungen (z. B. Crashsimulation) und nichtlineare Berechnungen sind mit modernen FE-Simulationswerkzeugen mittlerweile Stand der Technik. Eine Integration beider Technologien wird von Seiten der MK- wie auch der FE-Softwarehersteller vorangetrieben. Für die vorliegende Arbeit wurde die Vorgehensweise, ausgehend von der MK-Simulationssoftware, gewählt. Charakteristisch für die MFBD-Technologie (Multi-Flexible-Body-Dynamics<sup>1</sup>) ist die Möglichkeit, große Bewegungen mit kleinen Deformationen der Strukturkomponenten zu simulieren, weshalb diese Methode favorisiert wird. Diese Randbedingungen gelten explizit für die Simulation großer Verföhrbewegungen an Werkzeugmaschinen. Der erhebliche Größenunterschied von Starrkörperbewegungen und Strukturdeformationen stellt FE-Werkzeuge vor Probleme (vgl. Abschnitt 1.3), die in der Folge hohe Rechenzeiten und ungenaue Simulationsergebnisse nach sich ziehen.

Neben der Auswahl der geeigneten Solvetechnologie ergibt sich bei der Entwicklung einer Simulationssoftware hinsichtlich der Berechnung einer Werkzeugmaschine die folgende Aufgabe: Für den effizienten Einsatz im Konstruktionsprozess müssen vorgefertigte Modellkomponenten bereitgestellt werden. Die Umsetzung dieser

<sup>1</sup> Multi-Flexible-Body-Dynamics bezeichnet flexible Mehrkörpersysteme mit integrierten FE-Komponenten.

Funktionen erfordert flexible Schnittstellen in der Software:

- Eine Verbindung mit dem Solver zur Integration von Kräftelementen und Berechnungsalgorithmen und
- eine Anbindung an die Benutzerschnittstelle (Graphical User Interface, GUI), um die Modellkomponenten auswählen und parametrieren zu können.

In Bild 5.3 sind die sechs wichtigsten technologischen Kriterien kommerzieller Mehrkörpersimulationssysteme – für die in dieser Arbeit angestrebte Simulationsplattform – einander gegenübergestellt.

● volle Funktionalität ● eingeschränkte Funktionalität ○ nicht vorhanden								
Software	Anbieter	Herkunft	große Verfahr- bewegungen (MKS)	volle Knotenfreiheitsgrade	modale Reduktion	FEM-Präprozessor	Modellierung von komplexen Reglern	Schnittstelle zu CACE
RecurDyn®	FunctionBay, Inc	MKS	●	●	●	●	●	●
LMS Virtual. Lab®	LMS International	MKS	●	○	●	○	○	●
SIMPACK®	INTEC GmbH	MKS	●	○	●	○	○	●
MSC.ADAMS®	MSC. Software	MKS	●	○	●	○	○	●
SimulationX 2.0®	ITI GmbH	MKS	●	○	○	○	●	●
SAMCEF®	Samtech	FEM	●	●	●	●	○	●
Abaqus Explicit®	ABAQUS	FEM	●	●	●	●	○	●
ALASKA®	ifm e. V.	FEM	○	●	●	●	○	●

Bild 5.3: Mehrkörpersimulationssysteme und ihre Funktionen in Bezug auf die Berechnung von Verfahrbewegungen an Werkzeugmaschinen (Stand 03/2006)

Charakteristisch für die MKS ist die Möglichkeit der Simulation großer Bewegungen. Dahingegen ist – bis auf eine Ausnahme – die Berechnung der vollen Knotenfreiheitsgrade den FE-Programmen vorbehalten. Die Integration der Regelung in ein Gesamtmodell lässt sich bei allen aufgeführten Werkzeugen verwirklichen. Eine gemeinsame Simulation von komplexen Reglern (vgl. Abschnitt 3.4.3) ist hingegen nur in zwei Simulationssystemen möglich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Programmsystem RecurDyn der Fa. FunctionBay GmbH eingesetzt. Neben kommerziellen Anbietern arbeiten auch

Forschungsinstitute an Teillösungen. In einigen Bereichen lassen sich die Lösungen sehr gut anwenden, beispielsweise das System AMVis<sup>1</sup>. Dabei handelt es sich um ein Programm zur Visualisierung dreidimensionaler Bewegungen. Da aber die meisten Institute keine Serviceleistungen sowie Gewährleistung über das Forschungsprojekt hinaus bieten können, sind diese Werkzeuge für Unternehmen nur schwer einsetzbar und werden aus diesem Grund nicht weiter genutzt.

### 5.3 Umsetzung auf der Basis eines kommerziellen Werkzeugs

#### 5.3.1 Allgemeines

Für die nachhaltige Umsetzung der Forschungsergebnisse wurde eine strategische Partnerschaft mit der Fa. FunctionBay GmbH eingegangen. Ziel dieser Kooperation ist die Entwicklung einer Simulationsplattform für Werkzeugmaschinen und Produktionssysteme.

Die Schaffung maßgeschneiderter Simulationslösungen für Unternehmen ist bei Softwareherstellern üblich (DREISBACH 2007). Wie auch bei der Einführung der numerischen Simulation haben die Automobilhersteller und die Luft- und Raumfahrtindustrie dabei die Pionierarbeit geleistet. Durch die höheren Stückzahlen bzw. durch die größeren Forschungsbudgets wurde die Anpassung und Spezialisierung der Simulationsumgebung direkt bei den Softwareherstellern in Auftrag gegeben. In einer engen Zusammenarbeit erfolgte die Entwicklung der Module von der Modellerstellung bis zum Postprocessing. Aus diesen Projekten mit mehreren Partnern der gleichen Branche sind große Simulationsplattformen entstanden, wie beispielsweise ADAMS/CAR<sup>®2</sup>.

Im Bereich der Werkzeugmaschinen ist die Erstellung einer Simulationsplattform aufgrund der Komplexität der Systeme sehr aufwändig und würde ein einzelnes Unternehmen zu sehr belasten. Aus diesem Grund ist das beschriebene Vorgehen für die Hersteller von Werkzeugmaschinen und Produktionsanlagen ungeeignet. Deshalb müssen für derartige Branchen Forschungseinrichtungen die Rolle des Multiplikators übernehmen. In der vorliegenden Arbeit besetzt das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München (*iwb*) diese Rolle

---

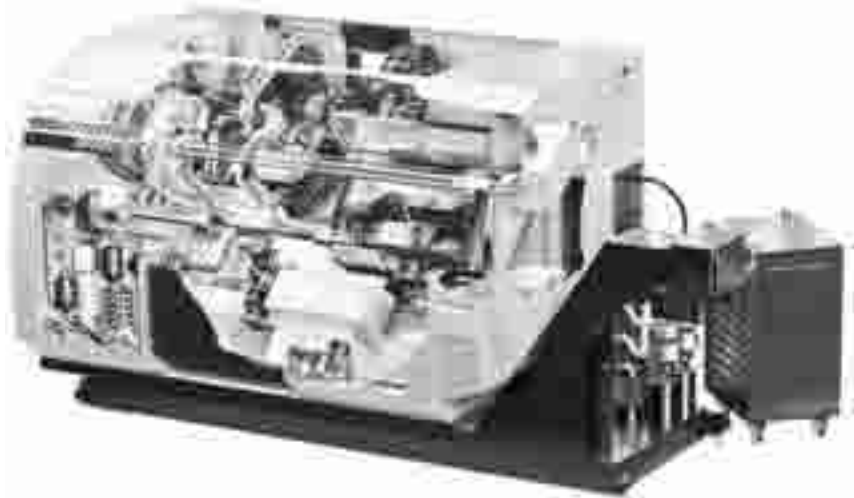
<sup>1</sup> Programm zur Visualisierung dreidimensionaler Bewegungen vom Lehrstuhl für Angewandte Mechanik an der Technischen Universität München.

<sup>2</sup> Spezielle Simulationsumgebung für den gesamten Automobilentwicklungsprozess

## 6 Anwendungsbeispiel

### 6.1 Inhalt des Kapitels

In diesem Kapitel werden die Umsetzung und die Verifikation aller der in dieser Arbeit verwendeten Methoden und Modelle anhand eines realen Entwicklungsprojekts beschrieben (Bild 6.1).



*Bild 6.1: Doppelspindel-Dreh- und Fräsbearbeitungszentrum Hyperturn 665 Powermill® der Fa. EMCO Maier GmbH*

In Abschnitt 6.2 wird nach der Erläuterung der Ausgangssituation und der Simulationsaufgabe das in Kapitel 3 beschriebene Vorgehensmodell Schritt für Schritt durchlaufen. Der Prozess beginnt im Anschluss an die Funktionsbeschreibung mit dem Entwurf des Kinematikmodells und endet mit der Konfiguration des hybriden Maschinenmodells aus getesteten Subsystemen.

In Abschnitt 6.3 liegt der Schwerpunkt auf der Simulation und der Verifikation des Modells. Zu diesem Zweck wurden konkrete Bearbeitungsaufgaben simuliert und mit umfangreichen Messergebnissen verglichen. Für Modellteile, an denen keine messtechnischen Untersuchungen durchgeführt werden konnten, sind die Ergebnisse denen einer FE-Analyse gegenüber gestellt.

Das Kapitel schließt mit einer Bewertung des Vorgehensmodells. Dafür werden Parallelen zu Industriezweigen gezogen, in denen die durchgängige, entwicklungs begleitende Simulation bereits mit Erfolg zum Einsatz kommt. Um dem Leser eine Wirtschaftlichkeits- und Nutzenbetrachtung zu ermöglichen, werden die Kosten für die Einführung der Simulation aufgeführt und der Nutzen für das Unternehmen mit dem erforderlichen Aufwand verglichen.

### 6.2 Modellbildung

#### 6.2.1 Ausgangssituation und Simulationsaufgabe

Als Beispielanwendung dient die Entwicklung eines Doppelspindel-Dreh- und Fräsbearbeitungszentrums<sup>1</sup>. Teile dieser Maschine wurden bereits zur Veranschaulichung von Modellen in den vorangegangenen Kapiteln herangezogen. Aufgrund der eingesetzten Technik ist die Hyperturn Baureihe für die Fa. EMCO von besonderer Bedeutung. Erstmals wurde ein Doppelspindelkonzept auf sehr kleinem Bauraum<sup>2</sup> realisiert, um dem Kunden eine kostengünstige Komplettbearbeitung von Stangenmaterial bis zu einem Durchmesser von 65 mm zu ermöglichen. Die Powermill 665 stellt das Spitzenmodell dieser Baureihe dar, eine Variante mit integriertem Fräskopf und insgesamt acht NC-Achsen<sup>3</sup>. Um die Entwicklung abzusichern, wurde dieses Projekt von Beginn an durch die Simulation begleitet. Die Erkenntnisse, die an dieser Maschine gewonnen werden, fließen in die Entwicklung neuer Baureihen ein.

Bei Maschinenkonzepten für die Mehrspindelbearbeitung tritt eine gegenseitige Beeinflussung von Haupt- und Gegenspindel auf. Die Auswirkungen sind auf den Werkstücken als Oberflächenfehler zu sehen. Besonders bei der Schlichtbearbeitung sind solche Effekte störend. Durch die hohe und dazu weit auskragende Masse des Fräskopfs wirkt sich der Oberflächenfehler an der Hauptspindel stärker aus, als an der Gegenspindel.

Die Störung kann durch unterschiedliche Anregungsmechanismen ausgelöst werden. Den größten Einfluss auf den Schlichtprozess haben Verfahrbewegungen im Eilgang an der Gegenspindel. Als weitere Ursache sind der Drehprozess an der Gegenspindel

---

<sup>1</sup> Hyperturn 665 Powermill® der Fa. EMCO Maier GmbH (Bild 6.1)

<sup>2</sup> Aufstellfläche: 2531 x 3376 mm ohne Späneförderer und Stangenlader

<sup>3</sup> Weitere technische Daten sind im Anhang C zu finden.

bei unterbrochenem Schnitt und Stöße durch einen Werkzeugwechsel zu nennen.

Ein wesentliches Simulationsziel für das hybride Maschinenmodell besteht in der Vorhersage der Beeinflussung der dynamischen Vorgänge an der Haupt- und der Gegenspindel und deren Auswirkungen auf die Oberfläche beim Schlichtprozess. In den folgenden Abschnitten wird die Durchführung der einzelnen Schritte aus der in Abschnitt 3.5 beschriebene Methode erläutert.

### 6.2.2 Kinematikmodell

Als Beispiel für den Aufbau eines Kinematikmodells nach Abschnitt 3.5.2 wird die Entwicklung der Fräseinheit beschrieben. Wie in Bild 3.12 gezeigt, erfolgt die Festlegung der Anforderungen für das mechanische Maschinenkonzept direkt aus der Funktionsbeschreibung. Daraus ergeben sich für die Fräseinheit folgende Randbedingungen: Die komplette Einheit darf einen vorgegebenen Bauraum nicht überschreiten, um sich in das modulare Maschinenkonzept der Hyperturn-Baureihe einzufügen. In diesem Bauraum sollte ein größtmöglicher Arbeitsraum realisiert werden, um ein möglichst breites Teilespektrum abzudecken. Aus technologischer Sicht sind die Faktoren Leistung der Frässpindel, Dynamik der Antriebsachsen sowie die Stabilität des Aufbaus entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Maschine.

Eine vollständige Fräsbearbeitung an der Hauptspindel setzt in der Funktionsbeschreibung die Definition von drei kartesischen Achsen und einer Schwenkachse voraus. Die einzelnen Schritte für eine optimale Umsetzung dieser Anforderungen anhand des Kinematikmodells zeigt Bild 6.2.

Neben den rein geometrischen Randbedingungen wie Arbeitsraum und verfügbarem Bauraum fließen die Leistungsdaten der Achsen für die unterschiedlichen Zerspanprozesse ein. Die Fräseinheit muss die Voraussetzungen für das Fräsen, Drehen und Bohren erfüllen. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel ist eine der vier zu realisierenden Achsen bereits festgelegt. Die Z10-Achse<sup>1</sup> ist bei allen Maschinen der Baureihe identisch ausgeführt und gilt somit als unveränderliche Randbedingung. Für den Aufbau der weiteren Achsen wurden unterschiedliche Kinematikkonzepte entworfen. In dieser Phase sollten so wenige Einschränkungen wie möglich gelten, damit die Kreativität in der Entwicklung nicht eingeschränkt wird (vgl. Abschnitt 3.5.2).

---

<sup>1</sup> Vorschubachse auf dem Bett in Z-Richtung



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Synthese der Methoden FEM und der MK-Simulation erstmals für die Simulation von großen Verbirgungsbewegungen an Werkzeugmaschinen angewendet. Diese neue Technologie erforderte die Entwicklung neuer Methoden, die in ein durchgängiges Vorgehensmodell für den Entwicklungsprozess integriert wurden.

Die Anwendung von Leichtbaustrategien und die Verwendung von Wissen aus dem Bereich der Mechatronik ermöglichen die Konstruktion leistungsfähigerer Maschinen mit geringerem Material- und Energieverbrauch. Die Integration unterschiedlicher Disziplinen und die steigende Komplexität der Produkte stellen hohe Anforderungen an die Entwicklung. Infolgedessen haben sich die wirtschaftlichen Randbedingungen für Hersteller von Produktionsmaschinen geändert. Die Konkurrenz im globalen Wettbewerb wird immer größer. Zudem liefern die Unternehmen aus den Schwellenländern in vielen Industriezweigen zunehmend bessere Produkte zu weit niedrigeren Kosten als die heimischer Anbieter (THE BOSTON CONSULTING GROUP 2006).

Um die Wettbewerbssituation nachhaltig zu verbessern und um im globalen Wettbewerb bestehen zu können, müssen die Entwicklungszeiten für innovative Produkte stark verkürzt werden. Der Konstrukteur steht dabei vor einem Dilemma: Innovative, neuartige Produkte stellen ein höheres Entwicklungsrisiko mit großem Aufwand dar. Ein kurzer Produkterstellungsprozess bedeutet aber den Verzicht auf aufwändige Hardwareprototypen, aus denen bisher wertvolle Informationen für die Konstruktion abgeleitet worden sind.

Dieser Zielkonflikt wurde in anderen Branchen<sup>1</sup> erfolgreich durch den Einsatz von virtuellen Prototypen aufgelöst. Um dieses Ziel in der Entwicklung von mechatronischen Produktionssystemen zu erreichen, sind Softwarewerkzeuge für die Simulation zu entwickeln. Ein innovatives Produkt in der Mechatronik kann nur in einer engen Kooperation aller beteiligten Disziplinen entstehen. Die eingesetzten Simulationswerkzeuge müssen daher eine solche interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützen. Sie sind zur Entwicklung und Optimierung des Systementwurfs zu nutzen und effizient in den Entwicklungsprozess einzubinden.

---

<sup>1</sup> Die Automobilindustrie und die Luft- und Raufahrtindustrie waren und sind die Vorreiter auf dem Gebiet der virtuellen Produktentwicklung.

## 8 Literaturverzeichnis

*ALBERTZ 1995*

*Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen-Gestellstrukturen. Diss. Technische Universität München (1995). Berlin: Springer 1995. ISBN: 3-540-60606-8. (inw Forschungsberichte 93).*

*ALTINTAS 2000*

*Altintas, Y.: Manufacturing Automation - Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge: Cambridge University Press 2000. ISBN: 0-521-65029-1.*

*ALTINTAS et al. 2005*

*Altintas, Y.; Brecher, C.; Weck, M.; Witt, S.: Virtual Machine Tool. Annals of the CIRP 54 (2005) 2, S. 651-674. (Keynote Paper of STC M)*

*ALTINTAS & ENGIN 2001*

*Altintas, Y.; Engin, S.: Generalized Modelling of Mechanics and Dynamics of Milling Cutters. Annals of the CIRP 50 (2001) 1, S. 25-30.*

*BAE et al. 2006*

*Bae, D.; Choi, J.; Cho, H.: A Relative Method for Finite Element Nonlinear Structural Analysis. In: Materials Science Forum, Bd. 505-507. 2006, S. 577-582. ISBN: 0-87849-990-3.*

*BAE & HAUG 1987*

*Bae, D. S.; Haug, E. J.: A Recursive Formulation for Constrained Mechanical System Dynamics: Part II. Closed Loop Systems. Mechanical Structures and Machines 15 (1987) 4, S. 481-506.*

ZIEHL 1996

Ziehl, A.: *Berechnung des dynamischen Strukturverhaltens von Portalfräsmaschinen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. ISBN: 3-18-322911-0. (VDI Fortschritt-Berichte 229).

ZIRN 1996

Zirn, O.: *Beitrag zum Entwurf von Vorschubantrieben für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (1996).

# 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 Montagesysteme**  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
**Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen**  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *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.*  
**Prozuntersuchungen 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.*  
**Systematik 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**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 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 Kapselfur zu 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 Fährer  
**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 Schlickerrieder  
**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 Wunsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
2008 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold  
**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage**  
2008 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8