

Lehrstuhl für
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des
mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**

Thomas Baudisch

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr. h. c. U. Heisel,
Universität Stuttgart

Die Dissertation wurde am 12.12.2002 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.03.2003 angenommen.

Forschungsberichte



Band 179

Thomas Baudisch

Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungs- dynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine

herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Technische Universität München

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2003

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2003

ISBN 3-8316-0249-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Meinen Eltern

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort des Verfassers

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

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Uwe Heisel, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Ich möchte mich weiterhin bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die durch zahlreiche Diskussionen und vielfältige Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich recht herzlich bei meinen Brüdern Christoph und Michael und allen Freunden, die während der zeitintensiven Erstellungsphasen der Arbeit verständnisvoll Rücksicht genommen und mir den Rücken freigehalten haben.

Mein herzlichster Dank gilt meiner lieben Freundin Claudia Kaiser, für ihr großes Verständnis und ihre aktive und moralische Unterstützung während der Zeit, in der die Arbeit entstand und in der Zeit der Prüfungsvorbereitung.

Ganz besonderer Dank gilt jedoch meinen Eltern Ernst Baudisch, Maria Baudisch-Zinke und Gerhard Zinke, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich auf meinem bisherigen Lebensweg in vielfacher Weise unterstützt haben. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

München, im März 2003

Thomas Baudisch

Wenn es einen Weg gibt, etwas besser zu machen, finde ihn.

Thomas Alva Edison, 1847-1931

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Entwicklungsprozess und Simulationseinsatz.....	4
1.3 Aufgabenstellung.....	6
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	9
2.1 Ziel der Arbeit	9
2.2 Vorgehensweise.....	10
3 Grundlagen	13
3.1 Aufbau und Funktionsweise einer Werkzeugmaschine	13
3.2 Begriffsbestimmung Mechatronik.....	17
3.3 Die Werkzeugmaschine — ein komplexes mechatronisches System.....	18
3.4 Simulationsmethoden in der Werkzeugmaschinenentwicklung	20
3.4.1 Die Finite-Elemente-Methode.....	20
3.4.2 Die Mehrkörpersimulation	21
3.4.3 Die Kinematiksimulation	22
3.4.4 Die Simulation von Regelkreisen.....	23
4 Stand der Forschung und Technik	25
4.1 Modellbildung von Werkzeugmaschinen.....	25
4.1.1 Modellbildung im Bereich der Mechanik	26
4.1.1.1 Modellbildung der Gestelle	26
4.1.1.2 Modellbildung der Antriebsmechanik	27
4.1.2 Modellbildung im Bereich der Regelung.....	31
4.1.3 Modellbildung im Bereich der Werkzeugmaschinensteuerung.....	33
4.1.3.1 Modellbildung im Bereich des NCK	34
4.1.3.2 Modellbildung im Bereich der SPS	35
4.1.4 Modellbildung des Gesamtsystems Werkzeugmaschine	35
4.1.5 Defizite und Handlungsbedarf	37
4.2 Integrationskonzepte.....	38
4.2.1 System- und Datenintegration.....	38
4.2.2 Methoden zur interdisziplinären Werkzeugmaschinenentwicklung	39
4.2.3 Defizite und Handlungsbedarf	42
4.3 Zusammenfassung und Fazit	42

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle	43
5.1 Problemfokussierung	43
5.1.1 Simulationsmethodenspezifische Modellbildung im Bereich der Mechanik	43
5.1.1.1 Finite-Elemente-Methode	44
5.1.1.2 Mehrkörpersimulation mit Starrkörpern	46
5.1.1.3 Mehrkörpersimulation mit flexiblen Körpern	47
5.1.1.4 Kinematiksimulation	49
5.1.1.5 Gegenüberstellung der Modellbildungsmethoden	50
5.1.2 Modellbildung mechatronischer Modelle	53
5.2 Anforderungen an ein geändertes Vorgehen	55
5.3 Konzept der neuen Modellbildungsmethodik	55
5.3.1 Aufbau der Mechatronik-Simulationsbausteine	57
5.3.2 Konfiguration simulationsmethodenspezifischer und mechatronischer Modelle aus den Mechatronik- Simulationsbausteinen	59
6 Konzeption eines Werkzeugs zur Unterstützung der Methode.....	61
6.1 Anforderungen an das Mechatronik-Simulation Management System	61
6.2 Konzeption des Mechatronik-Simulation Management Systems	62
6.3 Aufbau und Funktionsweise des Bibliotheksmoduls	65
6.4 Aufbau und Funktionsweise des Simulationsprojektmoduls	67
7 Konzeption der IT-Infrastruktur	69
7.1 Die Architektur der Simulationsumgebung	69
7.2 Die Datenebene	70
7.3 Die Kommunikationsschicht	74
8 Ausarbeitung der Simulationsumgebung	77
8.1 Aufbau mechatronischer Modelle zur Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen	77
8.1.1 Anforderungen an das mechatronische Gesamtmodell	77
8.1.1.1 Einflussgrößen der Mechanik	77
8.1.1.2 Einflussgrößen der Bahnerzeugung	81
8.1.1.3 Einfluss der Regelung	83
8.1.2 Definition der Systemgrenzen der für die Auslegung von Vorschubantrieben erforderlichen Mechatronik- Simulationsbausteine	83

8.1.3	Modellbildung der Mechatronik-Simulationsbausteine der mechanischen Komponenten	84
8.1.3.1	Modellbildung der Schnittstelle "Linearführung"	85
8.1.3.2	Modellbildung der Schnittstellen des Spindel-Mutter-Systems	89
8.1.3.3	Modellbildung der Schnittstelle "Rotationslager"	91
8.1.4	Konfiguration mechanischer Modelle.....	93
8.1.5	Modellbildung des Mechatronik-Simulationsbausteins "Servomotor"	94
8.1.6	Modellbildung des Mechatronik-Simulationsbausteins "Antriebsmodul".....	96
8.1.7	Konfiguration eines Elektronik-Modells	98
8.1.8	Modellbildung des Mechatronik-Simulationsbausteins "Lagesollwerterzeugung"	99
8.1.8.1	Konzepte zur Integration der Lagesollwerterzeugung in die Simulationsumgebung.....	99
8.1.8.2	Der Virtual Numerical Control Kernel	101
8.1.9	Konzeption eines Mechatronik-Simulationsbausteins "Virtual Programmable Logic Controller"	103
8.1.10	Konfiguration mechatronischer Gesamtmodelle.....	105
8.1.10.1	Mechatronische Gesamtmodelle zur Untersuchung der Bewegungsdynamik.....	106
8.1.10.2	Mechatronisches Gesamtmodell zum Test von NC-Programmen.....	107
8.2	Die IT-Infrastruktur	107
8.2.1	Die Laufzeitumgebung	108
8.2.1.1	Das Zeitmanagement	108
8.2.1.2	Die Kommunikation zwischen VNCK und Simulator	110
8.2.1.3	Die Kommunikation zwischen MKS- und CACE-Software	111
8.2.1.4	Die Middleware der Laufzeitumgebung	112
8.2.2	Die IT-Infrastruktur zur Unterstützung des verteilten, mechatronischen Entwicklungsprozesses	113
8.3	Das Mechatronik-Simulation Management System und die Anbindung an die Datenebene.....	115
8.3.1	Realisierung des Mechatronik-Simulation Management Systems.....	115
8.3.1.1	Aufbau und Funktionsweise des Bibliotheksmoduls.....	116
8.3.1.2	Aufbau und Funktionsweise des Simulationsprojektmoduls	118
8.3.2	Realisierung der Datenebene.....	119

9 Anwendungsbeispiel "Entwicklung eines Dreh-Fräsbearbeitungszentrums"	121
9.1 Anwendungsszenario.....	121
9.2 Anwendung der neuen Methode.....	124
9.3 Bewertung der Simulationsumgebung	136
10 Zusammenfassung und Ausblick	141
Literatur	145
Anhang	170
1 Abbildungsverzeichnis.....	170
2 Tabellenverzeichnis	175
3 Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme.....	176
4 Verzeichnis verwendeter Formelzeichen.....	178
5 Glossar.....	180
6 Implementierungen der Mechatronik-Simulationsbausteine.....	182

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Der Werkzeugmaschinensektor der Neunzigerjahre war davon gekennzeichnet, dass deutsche Werkzeugmaschinenhersteller aus dem Volumengeschäft der standardisierten und in großen Stückzahlen produzierten Werkzeugmaschinen verdrängt wurden. Als Ursache hierfür wird das in Deutschland im Vergleich zur internationalen Konkurrenz erhöhte Kosten- und Lohnniveau gesehen. Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie überlebte im Marktsegment der "High-Tech-Werkzeugmaschinen", einem Marktsegment, in dem innovative, auf die flexible Fertigung komplexer Produkte zugeschnittene Werkzeugmaschinen produziert werden. Im „High-Tech-Marktsegment“ sieht der deutsche Werkzeugmaschinenbau bis heute seine Stärke (Reinhart u. a. 1999; Schulz 1999; Wahl 2000).

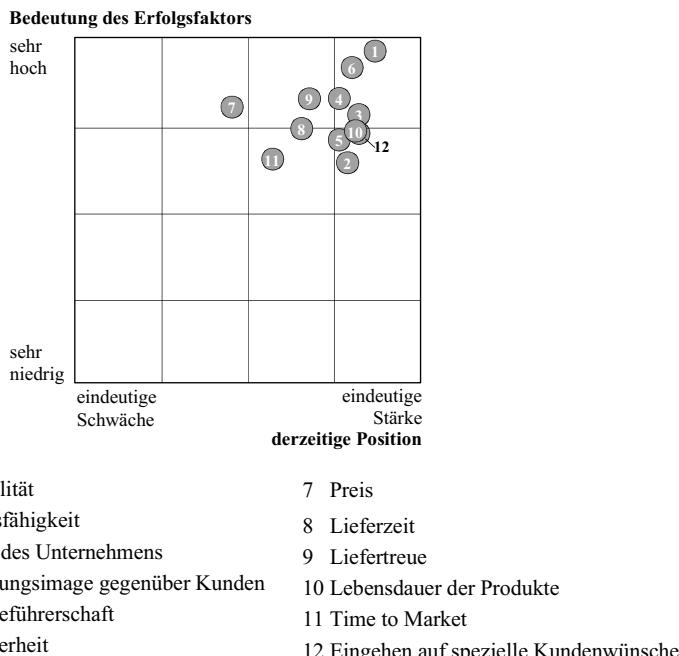


Abbildung 1-1: Erfolgsfaktoren-Portfolio 65 deutscher Industrieunternehmen aus den Branchen Aggregatehersteller (7), Elektrogrößgeräte (10), Maschinenbauliche Anlagen (9), Produktionsmaschinen (24) und Zulieferer (15) (nach Gausemeier u. a. 2000, S. 108)

In diesem Marktsegment unterliegt die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie wie die internationale Konkurrenz der aktuellen Marktsituation, die durch einen harten weltweiten Wettbewerb, sinkende Preise und die Kundenforderung nach qualitativ hochwertigen Produkten gekennzeichnet ist. Um in diesem Umfeld bestehen und eventuell sogar Wettbewerbsvorteile am Markt erlangen zu können, sind Maßnahmen zu ergreifen, die eine Verkürzung der Entwicklungszeiten, eine Verringerung des Aufwands für Prototypen und eine schnelle Reaktion auf Kundenforderungen ermöglichen (Eversheim u. a. 2002a). Maßnahmen, die diesbezüglich einzuleiten sind, treffen den Kern des Entstehungsprozesses einer Werkzeugmaschine, die Produktentwicklung. Diese weist heute wesentliche Defizite hinsichtlich Überschreitung von Entwicklungszeiten und Entwicklungskosten auf. Die daraus resultierenden Folgen machen sich unter anderem in einer langen Time to Market und einem hohen Preis bemerkbar (Abbildung 1-1).

Die Ursachen für die langen Entwicklungszeiten und die hohen Entwicklungskosten liegen unter anderem in der immer größer werdenden Komplexität der Werkzeugmaschinen begründet. Dies wird besonders an den NC-Vorschubsystemen einer Werkzeugmaschine deutlich. Hinsichtlich der kontinuierlich steigenden Anforderungen an die Produktivität bei gleicher oder gar gesteigerter Bearbeitungsqualität der Maschinen ist der Werkzeugmaschinenbau stetig darum bemüht, die Bewegungsdynamik der Werkzeugmaschinen zu steigern. Um dies zu erreichen, wird vor allem an der Steigerung des Beschleunigungsvermögens der Vorschubachsen gearbeitet, da ein hohes Beschleunigungsvermögen Voraussetzung ist, dass eine hohe Vorschubgeschwindigkeit auf den kurzen Verfahrwegen einer Werkzeugmaschine überhaupt in einer technologisch sinnvollen Zeitspanne erreicht werden kann. Ein hohes Beschleunigungsvermögen ist Voraussetzung für eine hohe Bahngenaugigkeit bei hoher Vorschubgeschwindigkeit und damit Voraussetzung für gesteigerte Produktivität bei gleicher oder gar gesteigerter Bearbeitungsqualität (Feldmann & Christoph 2000).

Aus physikalischen Gründen stellt die Forderung nach hoher Bahngenaugigkeit bei hoch dynamischen Verfahrbewegungen einen Zielkonflikt dar. Denn auf Grund der höheren Achsbeschleunigungen machen sich die Trägheitswirkungen der bewegten Komponenten proportional stärker bemerkbar. Dies erfordert stärkere Antriebe. Und dies wiederum hat eine erhöhte Belastung und Schwingungsanregung von Regelung, Antrieb und Gestellkomponenten zur Folge. Die Komplexität verschärft sich dadurch weiter, dass an der Erzeugung einer Werkstückkontur mehrere Achsen beteiligt sind. Da die Achsen in der Regel seriell aufeinander aufsetzen, können sich die Schwingungen der Einzelachsen überlagern. Die Überlagerung spiegelt sich in der Bewegung des Tool Center Points wider (Heisel & Ziegler 2002; Denkena & Liu 2001; Großmann u. a. 1995).

Mit der Erhöhung der Bewegungskennwerte nehmen die Wechselwirkungen zwischen mechanischem Gestellaufbau, Antriebskomponenten, Bahnerzeugung und Regelung stark zu. Schwingungen im Vorschubsystem und in der Maschinenstruktur sind

zunehmend nicht nur Abstimmungs- und Dämpfungsfragen im Bereich der mechanischen Komponenten, die durch Größe und Verteilung von Steifigkeits-, Trägheits- und Dämpfungsparametern beeinflusst werden können, sondern ebenso Fragen nach Reglerstrukturen, Verstärkereinstellungen und Abtastzeiten der Regelung und Messsysteme. Des Weiteren stehen die hoch integrierten Achsbaugruppen mit Werkstückspann- und Werkzeugwechselsystemen in Verbindung. Sensoren, Busse und Messsysteme bilden das Kommunikationsnetzwerk. Es wird ersichtlich, dass die Verfahrbewegung einer Werkzeugmaschine vom Zusammenwirken zahlreicher Teilsysteme abhängt. Für die Erzielung von Fortschritten im Bereich des Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen werden daher nicht mehr ausschließlich die einzelnen Teilsysteme optimiert, sondern stattdessen die Bahnerzeugung, die Regelung und die Mechanik gemeinsam ausgelegt. Dies führt zu den eingangs erwähnten Folgen, Verlängerung der Entwicklungszeiten und Erhöhung der Entwicklungskosten, da durch die gesamtheitliche Betrachtung der Teilsysteme im Entwicklungsprozess der Abstimmungs- und Kommunikationsbedarf der einzelnen Fachabteilungen stark ansteigt.

Aus dieser Situation heraus ergeben sich für die Werkzeugmaschinenindustrie zwei zentrale Fragestellungen: Wie können die immer komplexer werdenden Werkzeugmaschinen mit den ständig steigenden Anforderungen an die Produktivität und die Genauigkeit in zunehmend kürzeren Zeitabständen auf den wettbewerbsintensiven Werkzeugmaschinenmarkt gebracht werden? Und wie lässt sich dies zu marktverträglichen Preisen realisieren?

Die Vision auf diese Fragestellung ist die vollständig virtuelle Produktentwicklung (engl.: *virtual prototyping*). "Virtuelle Produktentwicklung" bezeichnet die durchgängige, entwicklungsbegleitende Planung, Evaluierung und Optimierung eines Produkts über Unternehmensgrenzen und -standorte hinweg an einem digitalen, zumeist dreidimensionalen Modell (virtueller Prototyp) (Eversheim *u. a.* 2002b; Großmann 2002; Reinhart & Fusch 2001, S. 8-2; Spur & Krause 1997, S. 58). Als besonderer Vorteil der virtuellen Produktentwicklung werden die dreidimensionalen Modelle gesehen, da durch die grafische Darstellung der verschiedensten Informationen viele Zusammenhänge, im Gegensatz zu einer zweidimensionalen oder textuellen Beschreibung, besser verständlich werden. Dies ist ein wesentlicher Ansatz, um das zunehmend wichtiger werdende Arbeiten in Entwicklungsverbünden zu erleichtern und infolgedessen die innerbetrieblichen Abläufe zu verbessern. Zudem sind Variationsrechnungen von einer frühen Entwicklungsphase am digitalen Prototypen recht einfach möglich. Und weiterhin macht sich der Verzicht auf Hardwareprototypen finanziell bemerkbar.

Der Nutzen des Einsatzes von 3D-CAD Systemen sowie von rechnergestützten Berechnungs- und Simulationsmethoden (CAE-Methoden) ist heute unbestritten (Feldmann 2000; Sauter & Lauber 2000). Die Kombination aus Simulation und Validierung der Ergebnisse anhand von Messungen am realen Prototyp gibt zudem die benötigte Sicherheit. Ein großer Teil der Großunternehmen, insbesondere die

Automobil- und Luftfahrtindustrie, arbeitet daher bereits an der Umsetzung dieser Vision, alle Produktdaten und Unternehmensprozesse in digitaler Form abzubilden, zu verwalten und zu optimieren (*Balasubramanian 2002, Rieckmann 2002*). Die Vorteile der virtuellen Produktentwicklung wurden in den letzten Jahren auch von der Werkzeugmaschinenindustrie erkannt und so findet heute auch im Werkzeugmaschinenbau eine immer stärkere Integration von modernen, rechnergestützten Entwicklungsinstrumenten in den traditionellen Entwicklungsprozess statt.

1.2 Entwicklungsprozess und Simulationseinsatz

Für Entwicklungen im Werkzeugmaschinenbau hat sich die Vorgehensweise nach der klassischen Konstruktionsmethodik, wie sie von *Koller (1994), Pahl & Beitz (1993), Rodenacker (1984)* und *Roth (1982)* allgemein für die Entwicklung von Produkten beschrieben wird, etabliert. Daher wurde die Methodik in der *VDI-Richtlinie 2221* noch einmal speziell für die Produktentwicklung im Maschinen-, Anlagen- und Apparatebau aufbereitet. Kennzeichen der heute in der Werkzeugmaschinenindustrie praktizierten Vorgehensweise ist ein sequenzielles Vorgehen (Abbildung 1-2). Dieses beginnt mit dem Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Ausgehend von der gegebenen Aufgabenstellung legt der Konstrukteur durch Abstrahieren, Aufstellen von Funktionsstrukturen und Suche nach möglichen physikalischen Wirkprinzipien zur Realisierung der Funktionen prinzipielle Lösungswege fest. Bei diesen ersten Schritten steht die funktionsorientierte Betrachtung im Vordergrund und gestalterische Fragen werden meist völlig vernachlässigt. IT-Werkzeuge werden in dieser ersten Phase, im Vergleich zu den nachfolgenden Phasen, kaum eingesetzt. Als Beispiel für eine Software, die die Konzeptphase unterstützt, seien die Kinematiksimulationsprogramme genannt, mit deren Hilfe z. B. die prinzipielle Anordnung der Maschinenkomponenten, die Anbringung von Aktoren und der sich daraus ergebende Arbeitsraum untersucht werden können.

An die Konzeptauswahl schließt sich die konstruktive Ausarbeitung der Lösung an. In dieser Phase wird zunächst meist ausschließlich gestaltorientiert gearbeitet. Funktionale bzw. dynamische Aspekte finden kaum Beachtung. Für diese Arbeitsschritte stehen in der Werkzeugmaschinenentwicklung leistungsfähige 3D-CAD-Programme zur Verfügung. Erst jetzt, wenn die ersten konstruktiven Entwürfe vorliegen, erfolgt die funktionale Betrachtung (Nachrechnung) der konstruktiven Lösung, die eine tiefer gehende Modellbildung nach sich zieht. In dieser Phase finden die Spezialprogramme MKS, FEM und Kinematiksimulation Anwendung. Diese beziehen eine Vielzahl an Informationen aus dem 3D-CAD-Modell. Mit Hilfe der Spezialprogramme erfolgt zunächst ausschließlich die Abstimmung und rechnerische Systemoptimierung der Mechanik, wobei eine zyklisch, sukzessive Abstimmung des gestaltorientierten mit dem funktionsorientierten Modell erfolgt. Erst gegen Ende dieses Prozesses, wenn praktisch die Entwicklung der Mechanik fast abgeschlossen ist, werden auch die Steuerungs- und Regelungstechnik

in die Analyse mit einbezogen. Die Auswahl und Parametrierung der Steuerungs- und Regelungstechnik finden in der Regel in einer eigenen Abteilung mit eigener, fachbereichspezifischer Spezialsoftware statt. Eine typische Software, die zur Auslegung der Antriebe eingesetzt wird, sind die Computer Aided Control Engineering Programme. Da die Modellbildung dieser Programme auf einer zweidimensionalen, blockorientierten Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge beruht, werden die für die Auslegung der Steuerungs- und Regelungstechnik erforderlichen Teilmodelle der Mechanik in der CACE-Software nachgebildet.

Werden im Rahmen der funktionalen Betrachtung Schwachstellen ersichtlich und infolgedessen Änderungen an der Konstruktion erforderlich, hat dies Auswirkungen auf alle Simulationsmodelle. So müssen die Änderungen allen Berechnungsingenieuren mitgeteilt und alle existierenden Modelle entsprechend angepasst werden. Der Aufwand für die Anpassung der Modelle nimmt stark zu, je später die Schwachstellen erkannt werden.

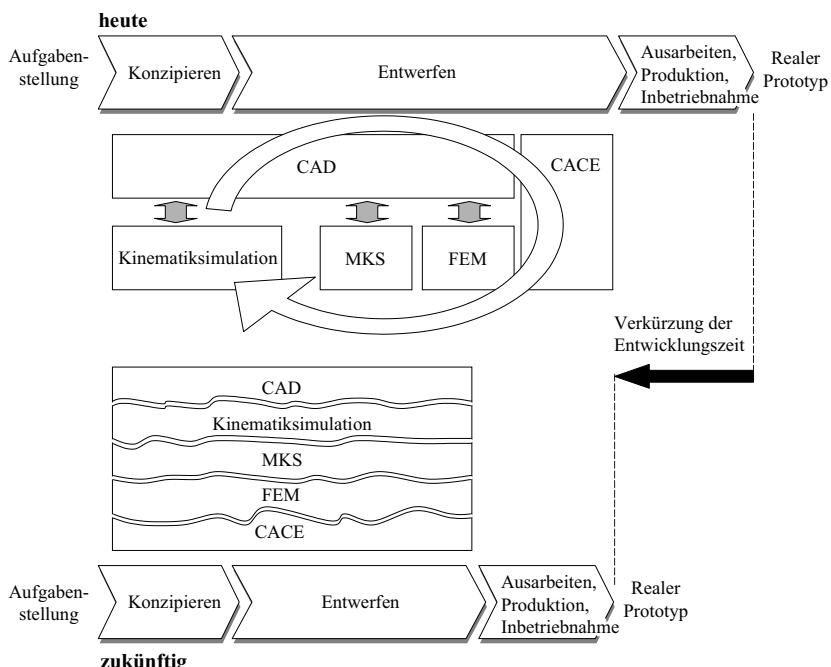


Abbildung 1-2: Der Simulationseinsatz im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen: eine Gegenüberstellung heute vs. zukünftig

Der heutige Simulationseinsatz ist durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Auf Grund der Komplexität der Vorschubbewegung und insbesondere der damit zusammenhängenden Bewegungsdynamik einer Werkzeugmaschine kommen zur Auslegung eine Vielzahl von Spezialprogrammen zur Anwendung. Die Programme zeichnen sich durch eine hohe Heterogenität hinsichtlich der erforderlichen Daten (Geometrie, Masse, Trägheitstensor usw.), der Datenformate (STEP, IGES, VDAFS usw. (*Anderl 1993; Grabowski u. a. 1991; Spur & Krause 1984*)), der Datenbasis und ihrer Schnittstellen aus.
- Die Modellbildung wird von Berechnungsingenieuren durchgeführt, die in der Regel auf ein spezielles Programm geschult sind. Daher bestehen in Bezug auf die Modellbildung bisher so gut wie keine Zusammenhänge z. B. zwischen einem Kinematik- und einem MKS-Modell. Die Folge ist, dass sich jeder Berechnungsingenieur die erforderlichen Daten für die von ihm benötigten Komponenten generiert, unabhängig davon, ob das gewählte Format oder die gewählte Systemgrenze von einem anderen Berechnungsingenieur wiederverwendet werden können.
- Hervorgerufen durch das disziplinspezifische Know-how besitzt jede Abteilung ihre eigenen Beschreibungsmittel und eine eigene Nomenklatur. So arbeitet die Mechanikkonstruktion vornehmlich mit dreidimensionalen Modellen, während die Elektrokonstruktion mit zweidimensionalen Beschreibungen arbeitet. Dies führt dazu, dass aus anderen Fachbereichen benötigte Teilsysteme, die dort zwar bereits als Modelle existieren, auf Grund der Inkompatibilität der Beschreibungsformen nachmodelliert werden.

Die derzeit gelebte, meist nur vertikale Integration der Modellbildungsschritte führt zu redundanter Datenhaltung, Brüchen in der Durchgängigkeit der Daten und zu Mehrfacheingaben. Folgen sind Inkonsistenz und Verminderung der Datenqualität und infolge davon eine niedrige Effektivität des Simulationseinsatzes und Zusatzkosten durch die Simulationssoftware. Durch die angestrebte horizontale Integration der Modellbildungsschritte findet eine stärkere Vernetzung der einzelnen Berechnungsingenieure statt, so dass jedes Zielsystem auf die gleichen Daten zugreifen und diese wiederverwenden kann.

1.3 Aufgabenstellung

Wie aus der Beschreibung der Ausgangssituation ersichtlich wurde, befindet sich die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie in einem Marktsegment, in dem sie auf Grund des internationalen Wettbewerbs technologisch hochwertige Werkzeugmaschinen hoher Komplexität in zunehmend kürzeren Entwicklungszeiten bei zugleich geringeren Entwicklungskosten auf den Markt bringen muss. Um in diesem Umfeld wirtschaftlich Werkzeugmaschinen auf den Markt bringen zu können, findet die

Simulation heute immer stärkeren Einzug in die Entwicklung von Werkzeugmaschinen. Kennzeichnend für den derzeitigen Simulationseinsatz ist jedoch, dass jede Abteilung und sogar abteilungsintern jeder Berechnungsingenieur seine eigenen, aufgabenspezifischen Modelle aufbaut (Abbildung 1-3), ohne auf Synergien zu achten. Dadurch ist die Modellbildung mit viel Aufwand verbunden und infolgedessen erreicht der Simulationseinsatz bisher nicht die gewünschte Effektivität.

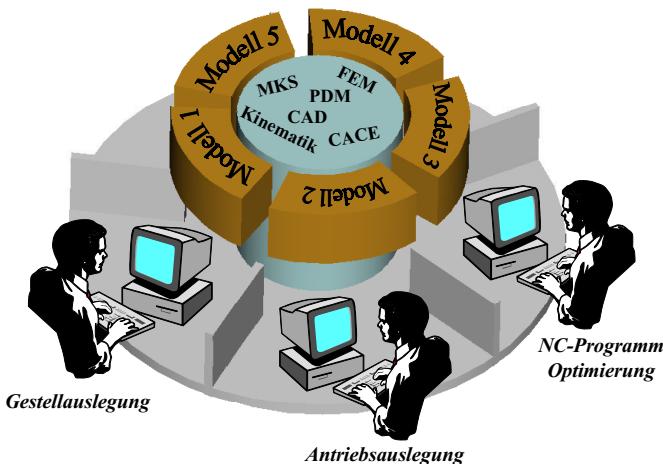


Abbildung 1-3: Die virtuelle Produktentwicklung heute

Besonders stark ist die Simulation dabei im Bereich der Auslegung der Bewegungsdynamik der Werkzeugmaschinen vertreten. Ursache hierfür ist die Komplexität der Erzeugung der Vorschubbewegung. Um das Bewegungsverhalten von Werkzeugmaschinen künftig weiter optimieren zu können, wird die gesamtheitliche Auslegung aller Teilsysteme während des gesamten Entwicklungsprozesses zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen. Auf Grund der zahlreichen Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen aus den unterschiedlichsten Fachbereichen wird der Abstimmungs- und Kommunikationsbedarf sowohl abteilungsintern wie auch abteilungsübergreifend während allen Entwicklungsphasen stark ansteigen. Dies hat weitreichende Auswirkungen auf die Modellbildung. Um die interdisziplinäre Zusammenarbeit der verschiedenen Abteilungen unterstützen zu können, muss eine neue, durchgängige Modellbildungsmethodik geschaffen werden, die die Kopplung und Wiederverwendung von Modellen und zugehörigen Daten ermöglicht. Dies ist heute nicht ohne weiteres möglich. Die verschiedenen Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Topologie und Systemgrenzen. Infolgedessen existieren kaum oder keine gemeinsamen Schnittstellen zwischen den Modellen. Die Ursachen hierfür

liegen zum einen im Fehlen einer durchgängigen Modellbildungsmethodik, zum anderen aber auch in einer fehlenden IT-Infrastruktur begründet. Die Folge ist, dass die Wiederverwendbarkeit von bereits aus anderen Abteilungen existierenden Modellen nicht möglich ist. Hierdurch erhöht sich einerseits der Aufwand für die Modellerstellung, andererseits werden redundante und auch inkonsistente Datenbestände erzeugt.

Will man die Effektivität der virtuellen Produktentwicklung steigern, setzt dies eine neue, auf den Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle zugeschnittene Methode voraus. An diese werden folgend Anforderungen gestellt:

- Kompatibilität der Modellstrukturen
- Existenz durchgängiger Modellschnittstellen
- Durchgängigkeit der Modellbeschreibung
- Dokumentation der Modelle und des Modellbildungsprozesses
- Verringerung des Datenaufkommens und
- Sicherstellung von Datenkonsistenz

Die dadurch erzielten durchgängigen und kompatiblen Daten und Modelle schaffen die Grundlage für ein gemeinsames Systemverständnis und führen zu einer Effektivitätssteigerung der Modellbildung und damit letztendlich zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit (Abbildung 1-2). Eine auf diese Punkte zugeschnittene Methode soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

2.1 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Simulationsumgebung, durch deren Anwendung der Aufwand für die Auslegung der realen Maschine anhand eines virtuellen Modells reduziert werden kann. Unter Simulationsumgebung wird dabei das Gesamtpaket aus einer Methode zum Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle, zugehörigen Werkzeugen sowie einer integrierenden IT-Infrastruktur verstanden. Die Entwicklungsumgebung ist auf die Analyse und Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen ausgerichtet.

Den Hauptschwerpunkt der Arbeit bildet die Methode, die darauf ausgerichtet ist, die interdisziplinäre Modellbildung mechatronischer Systeme zu erleichtern. Interdisziplinäre Modellbildung wird dabei im Sinn von durchgängiger Modellbildung der verschiedenen, fachabteilungsspezifischen Modelle verstanden. Durchgängigkeit bezeichnet die Konsistenz der für die unterschiedlichen fachbereichsspezifischen Simulationsprogramme generierten Daten sowie die Möglichkeit zur Kopplung der Modelle aus den verschiedenen Fachabteilungen.

Damit die Anwendung der Methode in der industriellen Praxis erleichtert wird, wird ein Werkzeug entwickelt, das die Methode softwaretechnisch unterstützt. Da die der Methode zu Grunde liegenden Programme und das Werkzeug auf Software basieren, wird zudem eine geeignete IT-Infrastruktur entwickelt, die alle erforderlichen Systeme integriert. Des Weiteren bildet die IT-Infrastruktur die Grundlage für die parallele und verteilte Entwicklung.

Die Simulationsumgebung wird als Hilfsmittel zur Auslegung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen entwickelt, da die Auslegung der Bewegungsdynamik, wie einleitend dargestellt, in besonderem Maße ein interdisziplinäres Vorgehen erfordert. Die Simulationsumgebung wird soweit aufgebaut, dass sie zur Untersuchung und Optimierung der Bewegungsdynamik mehrachsiger, gekoppelter NC-gesteuerter Verfahrbewegungen anwendbar ist. Einen neuen Ansatz stellt die hier verfolgte Integration von Original-Steuerungssoftware in das mechatronische Simulationsmodell der Werkzeugmaschine dar. Die für die NC-Simulation notwendige Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität zur Bahnerzeugung erfolgt damit nicht mehr wie bisher üblich durch Nachbildung, so dass infolgedessen die normalerweise üblichen Abbildungsprobleme höchst effektiv vermieden werden können.

2.2 Vorgehensweise

Zur Erreichung dieser Zielsetzung wird nach folgender Vorgehensweise vorgegangen (Abbildung 2-1): Im Folgenden werden zunächst die für das weitere Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen zusammengefasst. Hierzu wird zu Beginn der Aufbau und die Funktionsweise einer modernen Werkzeugmaschine vorgestellt. Anhand der Definition des Begriffs "Mechatronik" soll daraufhin nachgewiesen werden, dass moderne Werkzeugmaschinen klassische Beispiele für komplexe mechatronische Systeme sind. Im Anschluss daran werden die gebräuchlichsten Simulationsmethoden erläutert, die heute zur Auslegung von Werkzeugmaschinen eingesetzt werden.

In Kapitel 4 „Stand der Forschung und Technik“ werden Modelle beschrieben, mit denen es bereits heute möglich und üblich ist, die Werkzeugmaschine zu analysieren und zu optimieren. Dabei wird sowohl auf die Modellbildung der für die verschiedenen Teilsysteme üblichen Modelle als auch auf die Gesamtmaschinenmodelle eingegangen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Vorgehen bei der Modellbildung. Ein eigener Abschnitt innerhalb des Stands der Technik wird den Integrationskonzepten gewidmet. Dieser fasst die Arbeiten zusammen, die sich bisher hinsichtlich der System- und Datenintegration bzw. der Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit mit der virtuellen Produktentwicklung beschäftigt haben.

Ausgehend von den im Stand der Technik identifizierten Defiziten wird in Kapitel 5 das Konzept für die neue, verbesserte Vorgehensweise für die Modellbildung mechatronischer Systeme erarbeitet. Das Konzept basiert auf der Modellbildung des Gesamtsystems aus Bausteinen. Ein Hauptaspekt ist die Aufhebung der Informationsbarrieren zwischen den verschiedenen Entwicklungsbereichen und den Konstruktionswerkzeugen.

Um die Anwendung der Methode in der industriellen Praxis zu erleichtern und infolgedessen die Nachhaltigkeit der Methode sicherzustellen, wird in Kapitel 6 ein Werkzeug konzipiert, das die Methode unterstützt.

Weitere Aufgaben, die es in Zusammenhang mit der Entwicklung der Simulationsumgebung zu bewältigen gibt, ist das Management aller anfallenden Daten sowie die systemtechnische Integration aller beteiligten Programme. Die hierfür geeignete IT-Infrastruktur wird in Kapitel 7 entwickelt.

In Kapitel 8 wird die Ausarbeitung und prototypische Realisierung der in den vorausgegangenen Kapiteln vorgestellten Konzepte beschrieben. Dies erfolgt speziell für die Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens mehrachsiger, gekoppelter Verfahrbewegungen von Werkzeugmaschinen. So wird in Kapitel 8 auch die Realisierung der Einbindung von original Steuerungssoftware in die mechatronischen Werkzeugmaschinenmodelle vorgestellt.

In Kapitel 9 wird schließlich die industrielle Tauglichkeit der beschriebenen Vorgehensweise und der zugehörigen Werkzeuge und Modelle am Beispiel der Entwicklung eines Dreh-Fräsbearbeitungszentrums nachgewiesen. Eine Bewertung des hierfür erforderlichen Aufwands und des Nutzens runden das Kapitel ab.

Kapitel 1	Charakterisierung der Ausgangssituation und Ableitung der Aufgabenstellung
Kapitel 2	Zielsetzung und Vorgehensweise
Kapitel 3	Grundlagen für das Verständnis der Arbeit
Kapitel 4	Stand der Forschung und Technik <ul style="list-style-type: none">• Modellbildung in der Werkzeugmaschinenentwicklung• Konzepte zur System- und Datenintegration
Kapitel 5	Konzeption der neuen Methode zum Aufbau mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle
Kapitel 6	Konzeption eines Werkzeugs zur Unterstützung der neuen Methode
Kapitel 7	Konzeption einer IT-Infrastruktur <ul style="list-style-type: none">• Datenebene• Kommunikationsebene• Applikationsebene
Kapitel 8	Ausarbeitung von Methode, Werkzeug und IT-Infrastruktur
Kapitel 9	Verifizierung und technische und wirtschaftliche Bewertung an einem Praxisbeispiel
Kapitel 10	Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 2-1: *Vorgehensweise und Struktur der Arbeit*

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Abgeschlossen wird die vorliegende Arbeit mit einer Zusammenfassung und mit einem Ausblick auf mögliche, zukünftige Forschungsinhalte im Bereich der Modellbildung von Werkzeugmaschinen als mechatronisches System.

3 Grundlagen

Im vorliegenden Kapitel soll zum einen die ausführliche Erläuterung des Terminus "Mechatronik" nachgeholt und dessen Bezug zur Werkzeugmaschine herausgearbeitet werden. Zum anderen sollen alle für das Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen vermittelt werden. Hierzu zählt auch die Erklärung von Fachausdrücken, die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden.

Zunächst erfolgt eine Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise von Werkzeugmaschinen, insbesondere jedoch im Hinblick auf die Funktionsweise der NC-gesteuerten Bewegungsbahn des Werkzeugs, die im Fokus dieser Arbeit steht. Ausgehend davon wird der Bezug zur Mechatronik hergestellt.

3.1 Aufbau und Funktionsweise einer Werkzeugmaschine

Aufgabe einer Werkzeugmaschine ist die Erzeugung einer vorgegebenen Geometrie aus einem Rohteil oder Halbzeug. Die Erzeugung der gewünschten Geometrie erfordert eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Die Genauigkeit und Geschwindigkeit dieser Relativbewegung, auch Vorschubbewegung genannt (*DIN 6580*), hängt von zahlreichen Faktoren ab und entscheidet maßgeblich über die Qualität der Werkzeugmaschine. Ursprung der Vorschubbewegung bei einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine ist die Beschreibung der Bearbeitungsaufgabe durch ein NC-Programm (*DIN 66025*), das von der Werkzeugmaschinensteuerung abgearbeitet wird. Eine Werkzeugmaschinensteuerung setzt sich, wie in Abbildung 3-1 dargestellt, aus den zwei Modulen Numerical Control Kernel (NCK) und speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, engl. Programmable Logic Controller = PLC) zusammen. Die SPS gewährleistet die Anpassung des generalisierten NCK-Moduls an die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Werkzeugmaschine (Werkzeugwechsel und Werkzeugverwaltung, Überwachung von Maschinenzuständen, Sicherheitsfunktionen usw.). Der NCK ist für die Erzeugung des zeitlichen Verlaufs der achsspezifischen Lagesollwerte auf Basis des NC-Anwenderprogramms verantwortlich. Die Informationen des NC-Programms werden im Satzaufbereitungsmodul der Steuerung decodiert und nach geometrischen Daten (Weginformationen), technologischen Daten (Vorschub, Spindeldrehzahl) und Schaltfunktionen (Not-Aus, Kühlschmiermittel an/aus usw.) getrennt weiterverarbeitet. Die Verarbeitung der Geometrie- und Technologiedaten übernimmt der NCK-Teil der Steuerung. Die Schaltfunktionen werden von der SPS abgearbeitet (Abbildung 3-1). Dabei findet ein stetiger Informationsaustausch zwischen NCK und SPS statt.

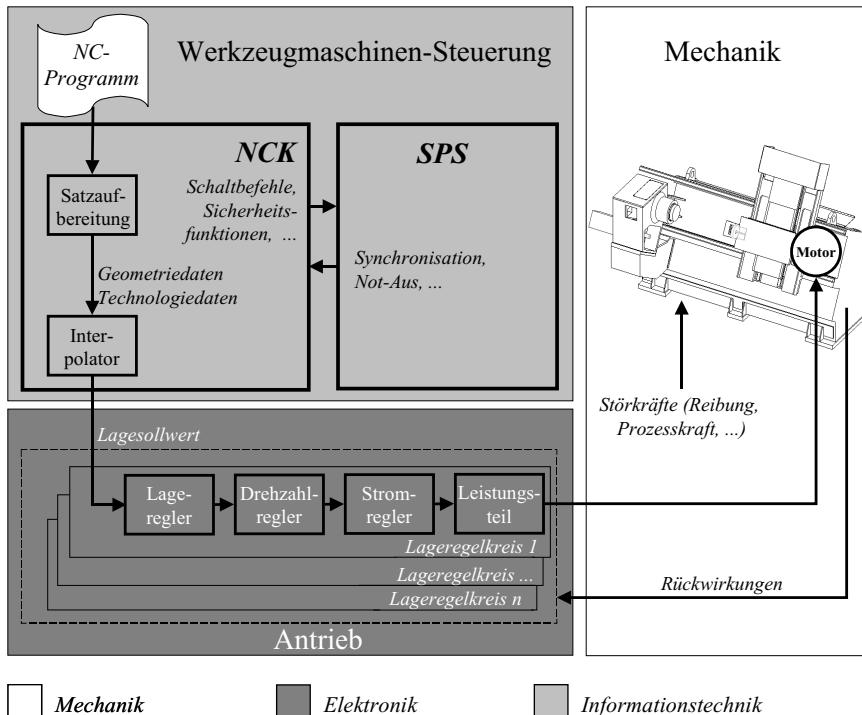


Abbildung 3-1: Prinzipielle Funktionsweise einer Werkzeugmaschine zur Erzeugung der Vorschubbewegung

Die vom NCK erzeugten, achsbezogenen Lagesollwerte werden über eine digitale Schnittstelle an die Achsregelmodule übertragen. Deren Aufgabe besteht in der Regelung von Lage, Drehzahl und Strom des Antriebssystems. Für die Regelung von Vorschubantrieben wird heutzutage üblicherweise eine digitale, kaskadierte Reglerstruktur bestehend aus Lage-, Drehzahl- bzw. Geschwindigkeits- und Stromregler eingesetzt. Den prinzipiellen Aufbau der kaskadierten Lageregelung zeigt Abbildung 3-2. Der Lagerregler besitzt dabei P-Übertragungsverhalten, während Geschwindigkeits- und Stromregler in der Regel als PI-Regler ausgeführt werden (Föllinger u. a. 1994, S. 270-274; Groß u. a. 2000, S. 93f.; Pritschow 1997; Rake 1994, S. 9/9f.; Weck 1995, S. 4). Hierin werden von außen nach innen mit immer kürzer werdenden Abtastzeiten der Lage-, Drehzahl- und Stromistwert zyklisch alle T Sekunden erfasst und mit den entsprechenden steuerungsintern erzeugten Sollwerten verglichen. Die hieraus resultierende Lageabweichung wird mit der Geschwindigkeitsverstärkung K_v gewichtet und als Stellgröße an den Drehzahlregler weitergegeben. Ebenso verfahren Drehzahl- und Stromregelkreis. Durch die Architektur der unterlagerten Regelschleifen verbleibt eine Ersatzverzögerungszeit für

das überlagerte System, so dass der innerste Regelkreis (Stromregelkreis) die Führungs dynamik der gesamten Struktur bestimmt. Durch Vorsteuern der unterlagerten Schleifen kann dieser Nachteil weitestgehend kompensiert werden. Die wichtigen Zustandsgrößen der Regelstrecke, Lage und Drehzahl, werden mit Hilfe von Messsystemen erfasst. Die kaskadierte Lageregelung ist zum Standard in der Werkzeugmaschinenindustrie geworden (Groß u. a. 2000, S. 93).

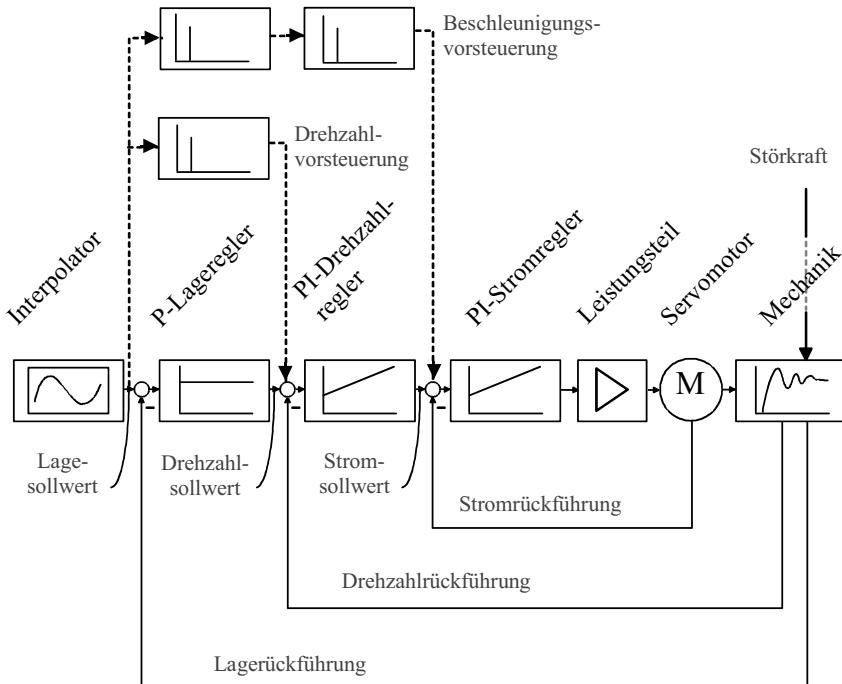


Abbildung 3-2: Blockschaltbild der kaskadierten Lageregelung eines Vorschubantriebs (Vorsteuergroßen alternativ eingezeichnet "—")

Ausgangsgröße der Regeleinrichtung sind Spannungssollwerte. Aufgabe des an die Regeleinrichtung anschließenden Leistungsteils ist es, gemäß der Spannungssollwerte ein dreiphasiges Spannungsfeld zum Antrieb des Servomotors zu erzeugen. Hierzu kommen heute Umrichtersysteme zum Einsatz, die überwiegend als getaktete Transistorsteller ausgeführt sind. Liegt die Spannung des Leistungsteils an den Wicklungen des Servomotors an, baut sich in den Wicklungen ein Strom auf, der ein stromproportionales Motormoment am Motorrotor erzeugt (Groß u. a. 2000, S. 143f.; Wissert 1996, S. 2ff.).

Die digitale Regeleinrichtung von Lage, Drehzahl und Strom zusammen mit dem Umrichtersystem werden häufig zu dem Begriff „Antrieb“ zusammengefasst. Wenn im Folgenden von Antrieb gesprochen wird, dann bezieht sich der Begriff "Antrieb" auf diese Definition. Jeder Vorschubachse wird üblicherweise ein eigener Antrieb zugewiesen.

Die Aufgabe der mechanischen Komponenten im Regelkreis ist es, das von dem Vorschubmotor erzeugte Drehmoment in eine lineare Bewegung der Vorschubachse zu wandeln. Zum mechanischen Übertragungssystem gehören alle Elemente im Kraftfluss zwischen der Motorwelle und dem bewegten Werkzeug bzw. Werkstück (Abbildung 3-3). Die wesentlichen Komponenten sind Motorrotor, Kupplungen und Getriebe, Spindel-Mutter-System und zugehörige Spindellagerung, Führung sowie der Schlitten, der die zu bewegende Komponente aufnimmt (*Milberg 1992, S. 271ff.; Reinhart 1997, S. 10-9*). Die Komponenten der Antriebsmechanik sind im Gestell gelagert. Der Kraftfluss für die Umwandlung der rotatorischen Motorbewegung in die lineare Vorschubbewegung durchläuft damit viele Einzelemente, vergleichbar einer Anordnung elastisch gekoppelter Massenträgheiten. Das schwingungsfähige Gesamtsystem besitzt mechanische Eigenfrequenzen, welche die verfügbare Bandbreite des Regelkreises begrenzen (*Rudloff u. a. 1991*). NC-Steuerung, geregelter elektrischer Antrieb und die mechanischen Übertragungsglieder der Antriebsmechanik werden im weiteren Verlauf der Arbeit als Vorschubantrieb bezeichnet.

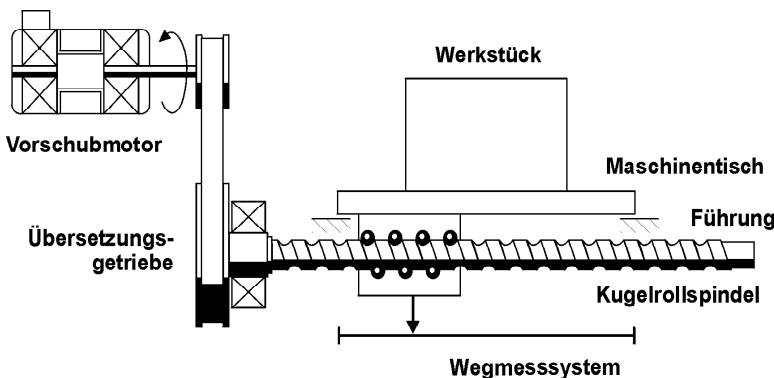


Abbildung 3-3: Prinzipieller Aufbau der Antriebsmechanik eines Vorschubantriebs mit Spindel-Mutter-System (Reinhart 2001)

Wie der Funktionsbeschreibung der Teilbereiche entnommen werden kann, hängt die Qualität der Vorschubbewegung nicht ausschließlich von den mechanischen Komponenten ab, sondern wird immer stärker durch die installierte Steuerungs- und Antriebstechnik beeinflusst.

3.2 Begriffsbestimmung Mechatronik

Im Folgenden soll der Terminus "Mechatronik" eingeführt werden, da dieser die Funktionsweise einer Werkzeugmaschine treffend umschreibt. Der Fachausdruck Mechatronik (engl. Mechatronics) ist ein Kunstwort aus den Begriffen Mechanik und Elektronik. Er wurde erstmals 1969 von der Japanischen Firma Yaskawa Electric Cooperation verwendet und zwei Jahre später von dieser Firma als Handelsname geschützt. Seit 1982 ist der Terminus wieder frei verfügbar (*Auslander 1996, Kyura & Oho 1996*). Das Verständnis des Begriffs Mechatronik ist vielfältig und wird durch die Ausrichtung der verschiedenen Forschergruppen unterschiedlich geprägt. Eine international häufig zitierte Definition wurde von der International Federation for the Theory of Machines and Mechanism (IFTMM) aufgestellt. Sie lehnt sich sehr stark an die Definition des Industrial Research and Development Advisory Committee (IRDAC) der Europäischen Union an (*Brussel 1996*). Die Definition der IFTMM lautet im Originaltext „Mechatronics is the synergistic combination of precision mechanical engineering, electronic control and system thinking in design of products and manufacturing processes.“ (*Kyura & Oho 1996*). In der Übersetzung von *Kallmeyer (1998, S. 7)* lautet die Definition folgendermaßen: „Mechatronik ist eine synergetische Kombination von Feinmechanik, Steuerungs- und Regelungstechnik und Informationstechnik beim Entwurf von Produkten und Produktionsprozessen“. Bei *Harashima u. a. (1995)*, *Heimann u. a. (1998, S. 13)*, *Isermann (1999, S.1)*, *Miu (1993)*, *Parkin & Kallenbach (1997)*, *Reinhart u. a. (2001D)*, *Roddeck (1997, S. 1)*, *Wallaschek & Kümmel (1997)* und *Zäh u. a. (2002)* sind ähnliche Definitionen zu finden. Stellvertretend für diese seien zwei weitere Definition aus dem Kraftfahrttechnischen Handbuch (*Bosch 2002*) und von *Lückel (2000)* vorgestellt. Das Kraftfahrttechnische Handbuch definiert „Mechatronik“ als die Ingenieurwissenschaft, die „die Funktionalität eines technischen Systems durch eine enge Verknüpfung mechanischer, elektronischer und Daten verarbeitender Komponenten erzielt“. Und *Lückel (2000)* beschreibt Mechatronik als „die Wissenschaft von den kontrollierten Bewegungsabläufen mechanischer Systeme mit Hilfe von Mikrorechnern“. Als alternative Bezeichnung für den Begriff „Mechatronik“ wird von *Gausemeier (1997)* die Bezeichnung „Integrativer Maschinenbau“ vorgeschlagen.

So existiert eine Vielzahl an Definitionen, die im Grunde aber alle den selben Kern haben: Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet, bei dem die Fachbereiche — im Folgenden auch Disziplinen genannt — Mechanik, Elektronik und Informationstechnik zusammenwirken um eine Funktionalität zu erreichen. Wenn im weiteren Verlauf der Arbeit von "Mechatronik" gesprochen wird, dann erfolgt dies vor dieser Definition. Die beteiligten Disziplinen sind dabei folgendermaßen definiert:

- Mechanik: Die Lehre von der Bewegung materieller Körper und Systeme unter dem Einfluss von Kräften, deren spezielle Herkunft jedoch unberücksichtigt bleibt (*Beitz 2001; Meyers 1999C*).

- Elektronik: Teilgebiet der Elektrotechnik, das sich u. a. mit der Elektrizitätsleitung von Elektronen in Festkörpern, Flüssigkristallen, Vakuum und in Gasen befasst und diese sowie die dabei auftretenden Effekte in technisch realisierbare Anwendungen, z. B. in der Nachrichten-, Medizin-, Regelungs-, Rechentechnik und elektronischen Datenverarbeitung, umzusetzen sucht (*Pütz 1992*).
- Informationstechnik: Die Wissenschaft, Technik und Anwendung von der systematischen, zumeist computerunterstützten Verarbeitung und Übermittlung von Informationen. Zu den Themen, mit denen sich die Informationstechnik beschäftigt, zählen u. a. die Systemtheorie, Modellbildung, Softwareentwicklung, Datenverarbeitung und künstliche Intelligenz (*Isermann u. a. 2002*).

Das Zusammenwirken der Teilbereiche ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Komplexität: Die Funktionalität wird durch das Zusammenwirken vieler Teilsysteme realisiert. Dadurch bestehen zwischen den Teilsystemen Wechselwirkungen.
- Heterogenität: Die beteiligten Teilsysteme entstammen den verschiedensten Fachbereichen.
- Substitution: Ehemals vorwiegend mechanisch realisierte Lösungen werden durch die Elektronik und die Informatik ersetzt.

3.3 Die Werkzeugmaschine — ein komplexes mechatronisches System

Spiegelt man die Funktionsweise der Vorschubbewegung einer Werkzeugmaschine an den charakteristischen Merkmalen eines mechatronischen Systems, so zeichnet sich eine Werkzeugmaschine durch folgende Eigenschaften aus:

- Komplexität: Die Funktionalität "Vorschubbewegung" kann nur durch die gemeinsame Abstimmung von Antriebsmechanik, Regelung und Lagesollwert-erzeugung optimal erreicht werden. So hat z. B. das NC-Programm (programmierter Überschleifabstand, Genauhalt) Einfluss auf die Bewegungsdynamik der Maschine. Und weiterhin haben Untersuchungen gezeigt, dass von der Anbringung der Lagemesssysteme ein entscheidender Einfluss auf die Bewegungsdynamik ausgeht.
- Heterogenität: Die Teilsysteme einer Werkzeugmaschine NC-Steuerung, Regelung sowie Gestell- und Antriebskomponenten entstammen den verschiedensten Fachbereichen, der Informationstechnik, der Elektronik und der Mechanik. Zwischen diesen bestehen starke Wechselwirkungen. Als Beispiele hierfür sei nochmals auf die zum Aufbringen der Antriebsleistung eingesetzten

trägheitsmomentarmen und hoch dynamischen Servomotoren hingewiesen, die in der Lage sind, das Gesamtsystem Werkzeugmaschine zu Schwingungen anzuregen. Die Schwingungen wiederum können durch steuerungstechnische Maßnahmen, wie die Vorgabe ruckbegrenzter Lagesollwerte oder den Einsatz von Filtern reduziert werden.

- Substitution: Bereits 1998 betrug der Anteil der Mechanik am Gesamtwert einer Werkzeugmaschine von ehemals 100 % nur noch 40 %, während die Anteile an Elektronik 20 % und Software 40 % betrugen. Diese Tendenz wird sich auch in Zukunft weiter fortsetzen (Bender 1998). Als Beispiel für die Substitution ehemals mechanisch realisierter Lösungen durch die Informationstechnik seien Montagefehler (Rechtwinkligkeitsfehler) oder Nachgiebigkeiten in der Mechanik (Durchhang) genannt, die heute durch die Steuerung kompensiert werden können.

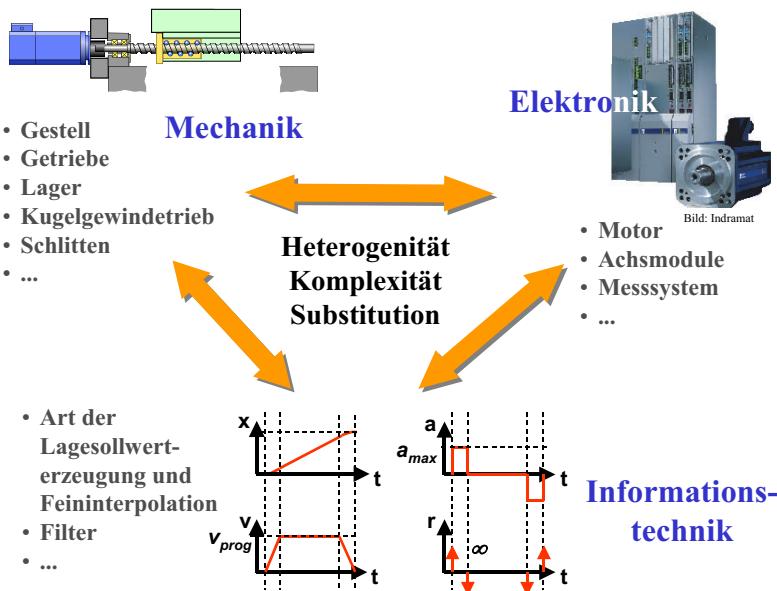


Abbildung 3-4: Die Werkzeugmaschine — ein komplexes mechatronisches System

Der durchgeführte Vergleich der "Mechatronik"-Definition mit der Funktionsweise eines Vorschubantriebs erlaubt den Schluss, dass eine Werkzeugmaschine ein sehr gutes Beispiel für ein komplexes mechatronisches System ist (Abbildung 3-4).

3.4 Simulationsmethoden in der Werkzeugmaschinenentwicklung

Die VDI-Richtlinie 3633 "Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionsystemen" beschäftigt sich grundlegend mit der Simulation. Sie beinhaltet zahlreiche Begriffe aus dem Umfeld der Simulation und gibt einen Überblick über die Durchführung von Simulationsstudien vom Lasten- und Pflichtenheft sowie der Leistungsbeschreibung für die Simulationsstudie bis hin zur Integration der Simulation in die betrieblichen Abläufe. So definiert die Richtlinie die Simulation als "ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind" (*VDI-Richtlinie 3633B*). Eine Fokussierung der bestehenden, allgemeinen Simulationsrichtlinie (*VDI-Richtlinie 3633*) auf die maschinennahe Simulation, in die zahlreiche Inhalte aus der vorliegenden Arbeit eingeflossen sind, befindet sich zurzeit in Arbeit (*Feldmann & Christoph 2001, VDI-Richtlinie 3633A*). Unter "maschinennaher Simulation" wird darin die Simulation der Fertigungsmaschine sowie deren unmittelbare Peripherie verstanden. Zweck der Richtlinie ist es, einen Überblick über die Möglichkeiten sowie den Nutzen von Simulationstechniken zu geben, die im Lebenszyklus einer Maschine eingesetzt werden können. In der Richtlinie werden die 3D-Kinematiksimulation, die Mehrkörpersimulation, die Maschinen- und Steuerungssimulation, die Prozesssimulation sowie die Simulation des maschinennahen Materialflusses betrachtet. Gemäß der Aufgabenstellung sind für den weiteren Verlauf der Arbeit diejenigen Berechnungs- und Simulationsmethoden von Interesse, mit deren Hilfe das dynamische Verhalten mehrachsiger, gekoppelter Verfahrbewegungen untersucht werden kann. Im Folgenden werden daher die 3D-Kinematiksimulation, die Mehrkörpersimulation und die Finite-Elemente-Methode tiefer gehend betrachtet. Des Weiteren wird eine Methode zur Simulation von Regelkreisen vorgestellt.

3.4.1 Die Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Näherungsverfahren für die Lösung partieller Differentialgleichungssysteme, die in der Regel nicht mehr geschlossen lösbar sind (*Freymann 2000; Klein 2000; Knothe & Wessels 1991*). Die FEM basiert auf dem Ansatz, das zu berechnende Kontinuum in eine große Anzahl einfacher, endlich großer Elemente (Finite Elemente) zu zerlegen, deren Verhalten entweder exakt oder näherungsweise bekannt ist. Bei den Elementen kann es sich um Stäbe, Balken, Platten, Schalen oder Volumenelemente mit unterschiedlicher Geometrie handeln. In jedem Finiten Element wird das Elementverhalten durch einen Satz von Ansatzfunktionen beschrieben, die die Verschiebungen und Spannungen in diesem Teilbereich wiedergeben. Die einzelnen Elemente sind über Knoten miteinander verknüpft. Unter Berücksichtigung von Kontinuitäts- und Gleichgewichtsbedingungen an den Knoten werden für das Gesamtsystem die Massen- und Steifigkeitsmatrizen aufgestellt. Diese

Vorgehensweise führt zu einem Gleichungssystem hoher Ordnung, dessen Lösung im Allgemeinen eine Näherungslösung für das behandelte System ist. Typische Aufgabenstellungen für eine FEM-Berechnung sind die Ermittlung von Bauteilverformungen unter Last sowie die Berechnung von Eigenfrequenzen und zugehörigen Eigenformen.

3.4.2 Die Mehrkörpersimulation

Die Mehrkörpersimulation (MKS) wird eingesetzt, um das dynamische Verhalten, d. h. die Starrkörperbewegungen sowie das Schwingungsverhalten, von technischen Systemen zu analysieren. Im Gegensatz zur FEM können die einzelnen Körper große, nicht lineare Bewegungen ausführen (Bestle 1994; Garcia de Jalón & Bayo 1994; Roberson & Schwertassek 1988).

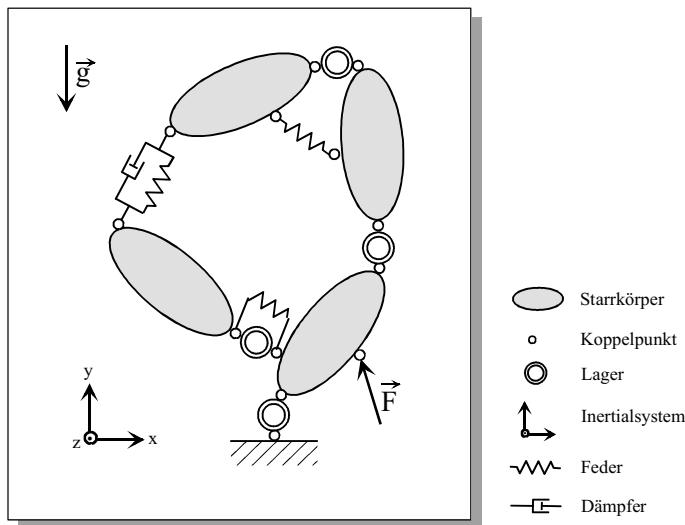


Abbildung 3-5: Aufbau und Elemente eines Mehrkörpermодells

Im Mehrkörpermодell werden die einzelnen Komponenten des realen Systems als Starrkörper abgebildet. Der Starrkörper enthält die Geometrieinformationen des Elements, das er repräsentiert, sowie Masse und Trägheitseigenschaften. Die Starrkörper werden durch Gelenke miteinander verbunden, so dass sich die Körper gegeneinander bewegen können. Die Gelenke werden als ideal, d. h. in den sperrenden Richtungen als unnachgiebig und in den freien Bewegungsrichtungen als reibungsfrei,

modelliert. Typische Gelenke für ebene Mehrkörpersysteme sind das Drehgelenk und das Schubgelenk, die ausschließlich eine relative Dreh- bzw. Translationsbewegung zwischen zwei Körpern zulassen. Typische Gelenke für dreidimensionale Mehrkörpersysteme sind Drehschubgelenk, Schraubengelenk, Kardangelenk und Kugelgelenk. Ist die Bindung zeitunabhängig, so bezeichnet man sie als skleronom. Gelenke, bei denen die Bindung explizit von der Zeit abhängt, wie das z. B. bei Lagestelgliedern der Fall ist, werden als rheonome Gelenke bezeichnet. Ein weiteres typisches Element zur Modellbildung ist das Kraftelement. Mit Hilfe des Kraftelements können die Starrkörper durch massenlose passive (Feder, Dämpfer) oder aktive Kraftelemente (Stellantriebe) verbunden werden. Innere und äußere Zustandsgrößen (Kraft, Moment, Geschwindigkeit, Beschleunigung usw.) können von so genannten Sensoren an beliebiger Stelle ausgewertet werden.

Obwohl die Mehrkörpersimulation zunächst als Verfahren zur Analyse der Starrkörperfynamik mechanischer Systeme entwickelt wurde, ist seit einiger Zeit auch die Berücksichtigung elastischer Bauteileigenschaften möglich. MKS-Modelle mit flexiblen Körpern werden als hybride MKS-Modelle bezeichnet. Hierzu werden entweder die Steifigkeits- und Massenmatrizen der elastischen Bauteile (siehe Finite-Elemente-Methode) direkt in der Gleichungslösung berücksichtigt (direkte Integration) oder die Ergebnisse von Finite-Elemente-Analysen in Form statischer und dynamischer Moden eingebunden (modale Synthese) (Bremer & Pfeiffer 1992; Geradin u. a. 1994; Schwertassek & Wallrapp 1999; Shabana 1994).

3.4.3 Die Kinematiksimulation

Im Gegensatz zu den dynamischen Modellen der FEM und MKS dient die 3D-Kinematiksimulation der grafischen Darstellung und Analyse von Bewegungsabläufen. Gemäß Meyers (1999a, S. 245) ist die Dynamik die Lehre von der Bewegung physikalischer Systeme unter dem Einfluss innerer oder äußerer Kräfte. Die Kinematik ist ein Teilgebiet der Dynamik. Sie beschäftigt sich mit der Untersuchung und Beschreibung der Körperbewegungen (Bahnkurve, Geschwindigkeit, Beschleunigung), ohne jedoch die sie verursachenden Kräfte zu berücksichtigen (Meyers 1999b, S. 300). Während also bei den FEM- und MKS-Modellen beispielsweise die Trägheitswirkungen der Maschinenkomponenten und die physikalischen Eigenschaften in den Koppelstellen (Reibung in den Führungsbahnen, Steifigkeit und Dämpfung von Getriebe, Lagern usw.) berücksichtigt sowie die inneren Kräfte und Momente ausgewertet werden können, ist dies bei Kinematikmodellen nicht möglich. Bei der Kinematiksimulation folgen die Bewegungen der Komponenten exakt den Sollwerten, die von Extern vorgegeben werden müssen. Voraussetzung für die 3D-Kinematiksimulation sind ein geometrisches und ein kinematisches Modell. Das Kinematikmodell legt die Bewegungsmöglichkeiten der Starrkörper des geometrischen Modells durch die Definition von Gelenken fest.

Typische Anwendungen der Kinematiksimulation bei Werkzeugmaschinen sind die Unterstützung bei der konstruktiven, geometrischen Bauteilauslegung, die Erstellung von korrekten, kollisionsfreien NC-Programmen, die Taktzeituntersuchung, der Test von SPS-gesteuerten Bewegungsabläufen sowie die Layoutplanung (Reinhart & Feldmann 1997).

3.4.4 Die Simulation von Regelkreisen

Entsprechend Abbildung 3-4 werden zur Auslegung mechatronischer Systeme auch Modelle der elektronischen Komponenten benötigt. Die elektronischen Bauteile selbst sowie deren gekoppeltes Verhalten können durch Gleichungen beschrieben werden, die in der Regel zu Differentialgleichungen führen.

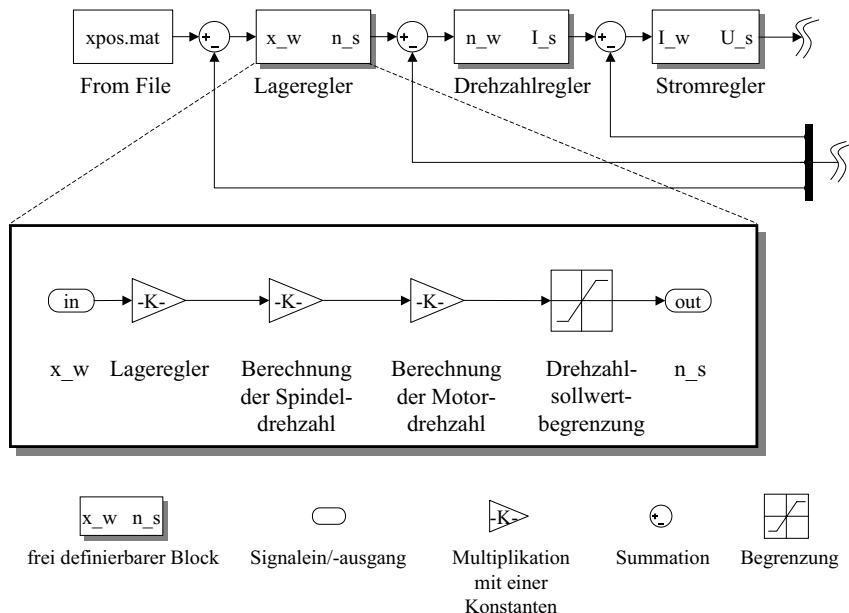


Abbildung 3-6: Blockorientierte Modellbildung elektrischer Zusammenhänge mit Hilfe einer CACE-Software

Eine regelungstechnisch orientierte Darstellungsform der elektronischen Zusammenhänge ist die Beschreibung durch Blockschaltbilder. Die Gleichungen, die das Verhalten der einzelnen Bauteile beschreiben, sind in Blöcken hinterlegt. Die Ein- und

Ausgangsgrößen der Blöcke können beliebig miteinander verknüpft werden. Auch beliebige mathematische Operationen (Summation, Multiplikation usw.) können auf die Signale angewendet werden (Abbildung 3-6). Auf diese Weise können nicht lineare und zeitvariante Differentialgleichungen modelliert und durch Simulation gelöst werden (*Hoffmann 2001*). Programme, die diese Vorgehensweise unterstützen, sind die so genannten Blocksimulatoren, die auch unter dem Begriff Computer Aided Control Engineering (CACE) Software bekannt sind.

Im Rahmen dieses Grundlagenkapitels wurde die Funktionsweise der Entstehung der Vorschubbewegung erläutert, um einen Einblick in die zahlreichen Parameter zu geben, die einen Einfluss auf die Bewegungsdynamik haben. Des Weiteren wurden die gebräuchlichsten Simulationsmethoden vorgestellt, die heute den Entwicklungsprozess im Werkzeugmaschinenbau unterstützen. Im nun folgenden Stand der Forschung und Technik werden Funktionsentstehung der Vorschubbewegung und Simulationsmethoden zusammengeführt. Ziel ist es, einen Überblick darüber zu geben, welche Teilsysteme in Bezug auf die Bewegungsdynamik heute bereits mit Hilfe der Simulation untersucht werden und welche Simulationsmethoden hierzu zur Anwendung kommen.

4 Stand der Forschung und Technik

In der Arbeit soll eine neue Methode zum durchgängigen Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle vorgestellt werden. Die Methode greift dabei auf bestehende Modelle zurück und versucht Synergien zwischen den Modellen aufzudecken und zu nutzen. Daher zeigt der Stand der Technik auf, mit welchen Simulationsmodellen die unterschiedlichen Disziplinen heute untersucht und ausgelegt werden.

Des Weiteren werden Arbeiten vorgestellt, die sich methodisch mit der Integration der Modelle und der zugehörigen Werkzeuge in einem simulationsgestützten Entwicklungsprozess auseinander gesetzt haben. Dies betrifft sowohl die verteilte Modellbildung wie auch die daten- und systemtechnische Integration.

4.1 Modellbildung von Werkzeugmaschinen

In der Anwendung gibt es bei mehrachsigen Maschinen viele Einflussgrößen, die die Dynamik einer Werkzeugmaschine beeinflussen und für eine Abweichung der tatsächlichen von der programmierten Bahn verantwortlich sind. Die Einflussgrößen führen dazu, dass die Ausführung der von der NC-Steuerung vorgegebenen Sollwerte durch die elektromechanischen Antriebssysteme nicht verzerrungsfrei erfolgt. Statt dessen entstehen Amplituden- und Phasenfehler zwischen Soll- und Istwerten. Als Ursachen dafür können die in dem System nur beschränkt zur Verfügung stehende Leistung (Begrenzung der Stellglieder), der immer vorhandene Energiespeicher (Elastizität, Induktivität) und unvermeidbare Störkräfte (Reibung, Bearbeitungskräfte) verantwortlich gemacht werden.

Maßnahmen zur Optimierung der Dynamik können demzufolge von verschiedenen Seiten angegangen werden. Entsprechend existieren Forschungsarbeiten, die sich mit der Optimierung der Dynamik von Regelungstechnischer Seite beschäftigen, z. B. durch Verbesserung der Einstellung der Reglerparameter oder durch die Erforschung neuer Regelungskonzepte. Andere versuchen durch Änderungen am NC-Programm positiv auf die Dynamik einzuwirken. Dritte haben die Optimierung der Strukturkomponenten im Fokus und wieder andere beschäftigen sich mit dem Gesamtsystem. Im Rahmen all dieser Forschungstätigkeiten wird heute die Simulation unterstützend eingesetzt. Die physikalischen Eigenschaften der realen Maschine werden dabei, dem Anwendungszweck entsprechend, mehr oder weniger detailliert nachgebildet. Zum Teil wird auch Hardware in die Simulationsmodelle integriert (Hardware-in-the-Loop Simulation). Um die Übersicht über die Modelle transparent zu gestalten, werden zunächst die für die verschiedenen Teilbereiche — Gestell- und Antriebsmechanik, Regelung und Werkzeugmaschinensteuerung — einer Werkzeugmaschine vorhandenen Modelle detailliert vorgestellt. Im Anschluss daran wird ein Überblick über die Gesamtmaschinenmodelle gegeben, die sich durch Kombination der vorher vorgestellten Modelle der Teilsysteme ergeben.

4.1.1 Modellbildung im Bereich der Mechanik

4.1.1.1 Modellbildung der Gestelle

Am Beginn der Berechnung des statischen und dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinengestellstrukturen standen prinzipielle Überlegungen über die vereinfachte Modellbildung von Maschinenkomponenten. Diese begannen mit der Berechnung des Verformungsverhaltens von Werkzeugmaschinen auf Basis einfacher Mehrmassenmodelle, in denen starre, mit Masse behaftete Körper durch Feder- und Dämpferelemente verbunden wurden (Witek 1977; Höhne u. a. 1996). Der wesentliche Nachteil dieser Modelle lag darin, dass das Verformungsverhalten der einzelnen Komponenten nicht berechnet werden konnte. Aus der Forschung nach Verfahren zur Berechnung des Bauteilverhaltens entstand der Ansatz, die Bauteile aus einer Vielzahl einzelner zwei- und dreidimensionaler Elemente (Finiter Elemente) zusammenzusetzen, von denen die analytische Beschreibung des Last-Verformungsverhaltens bekannt ist. Die Finite-Elemente-Methode konnte anfangs nur für Analysen des statischen Verformungsverhaltens einzelner Bauteile erfolgreich eingesetzt werden (Felten 1974, Heimann 1977).

Die Berechnung des dynamischen Verhaltens kompletter Werkzeugmaschinen hinsichtlich Eigenfrequenzen machte neben der Modellierung der mechanischen Gestellstruktur die Erfassung der Verbindungen der verschiedenen Bauteile durch ruhende (Schraubverbindungen) oder bewegte Fügestellen (Linearführungen) erforderlich (Finke 1977). Die Herausforderung hierbei bestand in der sicheren Beschreibung der Eigenschaften der Fügestelle (z. B. Reibungseffekte, Steifigkeit, Dämpfung). Infolgedessen entstanden eine Reihe von Arbeiten, die die Untersuchung dieser Zusammenhänge zum Inhalt hatten. Wichtige Ergebnisse für die Modellbildung der Federsteifigkeit normalbelasteter Schraubverbindungen in Abhängigkeit von Geometrie, Material, Oberflächenbeschaffenheit, Benetzung der betrachteten Flanschpaarung sowie der Flächenpressung in der Kontaktzone sind bei Albertz (1995) zu finden. Richtlinien für die FE-Modellbildung von Gleitführungen wurden von Heisel u. a. (1996) erarbeitet. Die zur Beschreibung des physikalischen Verhaltens von Gleitführungen erforderlichen Parameter wurden unter anderem von Petruelli (1983) ermittelt. Er untersuchte den Einfluss bewegter und unbewegter Fügestellen auf das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen. Bezuglich der bewegten Fügestellen betrachtete er dabei die hydrodynamische Gleitführung. Ähnliche Untersuchungen für Profilschienen-Wälzführungen wurden von Christov (1995) und Ispaylar (1997) durchgeführt.

Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor bei der Modellbildung bleibt jedoch das Fehlen von zuverlässigen Angaben für lokale Dämpfungseffekte. Wie dennoch sinnvolle Berechnungen durchgeführt werden können, ist Gegenstand weiterer, zahlreicher Forschungsarbeiten. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Bei Modellen der ersten Gruppe bleiben Dämpfungen zunächst völlig unberücksichtigt. Nach

Berechnung des ungedämpften Schwingungssystems wird für jede bestimmte Eigenschwingung auf Grund von Erfahrungswerten oder Messergebnissen (experimentelle Modalanalyse) ein globales Systemdämpfungsmaß geschätzt und damit in einem nachgeschalteten Berechnungsschritt das frequenzabhängige Nachgiebigkeitsverhalten der Maschinenstruktur bestimmt (Albertz 1995). Bei Modellen der zweiten Gruppe wird die Dämpfung in den Fügestellen von Beginn an durch Schätzwerte berücksichtigt. Die Abstimmung zwischen Modell und Realität (model updating) erfolgt durch den Abgleich von Messwerten mit den berechneten Werten in einem nachgeschalteten, iterativen Prozess (Link 1997; Nebeling 1998; Pascual & Golinvual 1998).

Abschließend sei noch auf die große Gruppe von Arbeiten hingewiesen, die sich mit der Optimierung steifigkeitskritischer Gestellbauteile beschäftigen. Ziel ist es, aus der Vorgabe einer Ausgangsstruktur und der Definition realistischer Randbedingungen mit Hilfe numerischer Verfahren automatisch eine optimierte Bauteilstruktur berechnen zu lassen. Die numerischen Verfahren basieren dabei auf der Finiten-Elemente-Methode. Hierzu gibt es Arbeiten, die sich mit der Wandstärkenoptimierung (Kölsch 1992), der Gestaltoptimierung (Weck & Büßenschütt 1995) oder der Topologieoptimierung (Reinhart u. a. 2000, Sauter 1999) beschäftigen.

4.1.1.2 Modellbildung der Antriebsmechanik

Im Vergleich zur Gestellmechanik ist die Antriebsmechanik besonders eng in den Verhaltenskomplex von Prozess und Regelung verflochten. Die im Folgenden vorgestellten Modelle der Antriebsmechanik werden daher meist nicht allein stehend untersucht, sondern sind häufig mit Regelungsmodellen (siehe Kapitel 4.1.2) gekoppelt. Häufiges Anwendungsgebiet der Simulation im Bereich der Antriebsmechanik, neben der Optimierung der Komponenten, ist die Untersuchung der Eignung verschiedener Antriebskonzepte. So werden z. B. Direktantrieb oder Antrieb über Getriebe, angetriebene Spindel oder angetriebene Spindelmutter, Fest-fest-, Fest-los- oder Fliegende-Lagerung miteinander verglichen.

Diskrete Modellbildung der Antriebsmechanik

Prinzipiell stellt die mechanische Struktur eines Kugelgewindetriebes einen kontinuierlichen Schwinger dar. Für die Nachbildung der komplexen, mehrdimensionalen, mechanisch nachgiebigen Struktur „Antriebsstrang“ hat sich in der Antriebstechnik allgemein die vereinfachende Modellierung in Form von gekoppelten, gedämpften Feder-Masse-Swingern durchgesetzt, welche die Nachgiebigkeiten diskret und in der Regel eindimensional beschreiben. Hierzu wird für jede auftretende dominante Resonanzfrequenz im Antriebsstrang oder für die Rückwirkung einer Resonanzstelle außerhalb des Antriebsstranges ein gedämpfter Feder-Masse-Schwinger angesetzt (Hamann u. a. 1993; Pritschow 1997; Weck 1995). Die

Modellierungen reichen im einfachsten Fall von Modellen mit einem Freiheitsgrad, bei dem die gesamte Mechanik auf eine träge Masse reduziert und über eine Torsionsfeder mit dem Motorrotor verbunden wird (Abbildung 4-1) (Groß u. a. 2000, S. 218), über Modelle mit vier oder fünf gekoppelten Feder-Masse-Schwingern bis hin zu Modellen, die das schwingungsfähige System durch sieben Feder-Masse-Schwinger abbilden.

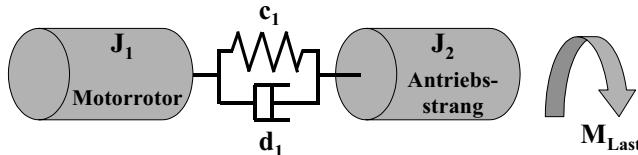


Abbildung 4-1: Einfaches Ersatzmodell für einen elektrischen Vorschubantrieb bestehend aus zwei Massen, die durch ein Feder-Dämpfer-System verbunden sind (J_1 : Trägheitsmoment Motorrotor, J_2 : Summe der auf den Motorrotor reduzierten Trägheitsmomente der Einzelmassen des Antriebsstranges, M_L : Lastmoment)

Bei dem Modell mit zwei Feder-Masse-Schwingern werden sämtliche mechanischen Parameter des Übertragungssystems auf die Variablen c_1 , d_1 , J_1 und J_2 verdichtet. Infolgedessen kann der Konstrukteur mit diesem Modell so gut wie keine Informationen über die mechanischen Zusammenhänge im Antriebsstrang gewinnen. Will man bei vergleichsweise geringem Aufwand dennoch die wesentlichen mechanischen Übertragungselemente Zahnriemenstufe, Kugelgewindetrieb, Spindellagerung und Führungssystem in die Gesamtbetrachtung mit einbeziehen, so muss man zu den Modellen höherer Ordnung übergehen.

Die Modellierung des Antriebssystems als System bestehend aus fünf elastisch gekoppelten Massen (Motorrotor, Spindelhälfte 1, Spindelhälfte 2, Spindelmutter, Tisch) wird als besonders sinnvoll angesehen, da alle wesentlichen Komponenten des Antriebs einzeln im Modell erscheinen (Zirn 1996, S.36). Die Spindel wird bei diesem Modell in zwei gleiche Hälften aufgeteilt, um die Nachgiebigkeit der Spindel in Abhängigkeit von der Position des Schlittens genauer abbilden zu können. Ist ein Getriebe vorhanden, so wird bei dem Modell mit fünf Massen die Masse des Ritzels auf den Motorrotor und die träge Masse des Rades auf die erste Spindelhälfte reduziert.

Modelle noch höherer Ordnung reduzieren beispielsweise die Massen von Rad und Ritzel bei einem Getriebe nicht auf den Motorrotor bzw. die Spindel, sondern modellieren diese durch weitere Feder-Masse-Schwingen. Oder es werden auch die Messsysteme (Inkrementalgeber des Motors, Linearmaßstab) durch eigene Feder-Masse-Schwinger abgebildet. Beispiele hierfür sind bei Bretschneider (1996, S.7,8), Bürgel (2001, S.56), Eubert (1992, S.34), Groß u. a. (2001) oder Weissenberger (2001, S.70) zu finden. Das in Abbildung 4-2 dargestellte physikalische Ersatzmodell

eines Vorschubantriebsstranges bestehend aus sieben Massen, die jeweils durch ein Feder-Dämpfer-System verbunden sind, entspricht der von Groß u. a. (2001) vorgeschlagenen Modellierung.

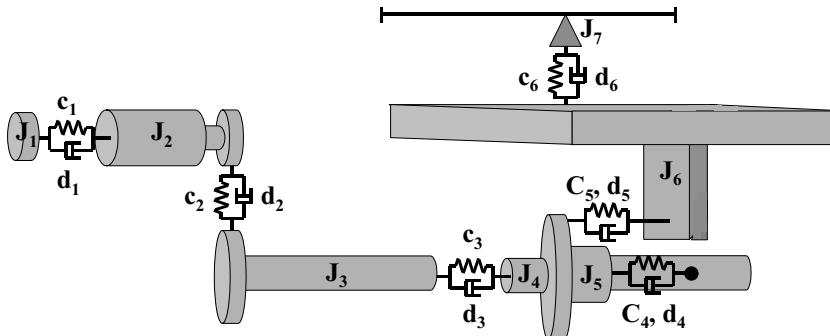


Abbildung 4-2: Mechanik eines Vorschubantriebssystems als sieben Massen System
(J_1 : Istwertgeber Motorrotor, J_2 : Motorrotor mit Ritzel, J_3 : Rad + $\frac{1}{2}$ Spindellänge, J_4 : $\frac{1}{2}$ Spindellänge, J_5 : Spindelmutter, J_6 : Tisch, J_7 : Messsystem)

Modellbildung der Antriebsmechanik mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode

Die Modellbildung von Vorschubantrieben kann mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode beliebig verfeinert werden. Im Gegensatz zu den vorher vorgestellten Modellen, bei denen das elastische Bauteilverhalten in den Feder- und Dämpferelementen berücksichtigt werden musste, werden hier die einzelnen Komponenten selbst als flexible Körper abgebildet. Die ersten Arbeiten auf diesem Gebiet beschränkten sich rein auf die Ermittlung des Torsionsverhaltens. Müller (1980) entwickelte die Programme TORS und TONA. Sie waren auf die Modellierung des Torsionsfreiheitsgrades beschränkt, so dass mit ihrer Hilfe ausschließlich Aussagen über Eigenfrequenzen und Eigenformen von Antriebsstrukturen getroffen werden konnten. Einflüsse aus der Wellenbiegung oder durch Lagernachgiebigkeiten konnten nicht mit einbezogen werden. Summer (1986) stellt schon bei der zweiten Eigenfrequenz einer Teststruktur mit sechs Wellen deutliche Abweichungen fest.

Angetrieben von dieser Tatsache erarbeitete Summer (1986) ein Modell, das alle Belastungen in kraftflussverzweigten Antriebsstrukturen erfasst. Hierfür wurde das auf der Matrix-Verschiebungs-Methode basierende Programm ASDY (Antriebsstrukturen dynamisch) entwickelt, das an jedem diskretisierten Knotenpunkt die maximale Auflösung der sechs möglichen Freiheitsgrade gewährleistet. Das Programm besitzt

eine umfassende Elementbibliothek zur Abbildung antriebsspezifischer Bauelemente und erlaubt die Modellierung mehrstufiger, verzweigter Getriebestrukturen. Anwendung fand das Programm ASDY z. B. von Zäh (1995) zur Untersuchung des Antriebsstrangs einer Kreissäge. ASDY wurde von nun an fortlaufend erweitert und verbessert. In der Endversion ELFE_FE verfügt die Elementbibliothek über die für elektrische Vorschubantriebe wichtigen Elemente Zahnriemenstufe und Zahnradstufe und insbesondere über das Modell einer Kugelrollspindel-Mutter-Einheit. In dieser Ausbaustufe wurde das Modell von Simon (1986) und Eubert (1988) zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Vorschubantriebsstrukturen eingesetzt. Die Modellbildung besteht in der Generierung eines Datensatzes, der zum größten Teil aus rein geometrischen Systemgrößen besteht, die einer einfachen Skizze entnommen werden können (Abbildung 4-3).

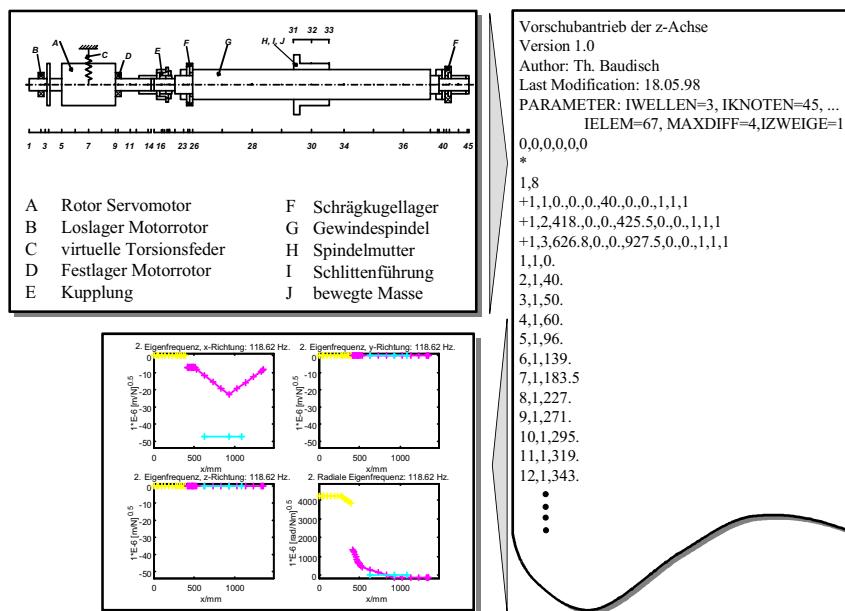


Abbildung 4-3: Auf 45 Knotenpunkte mit je 6 Freiheitsgraden diskretisiertes Modell eines Vorschubantriebs und Auszug aus dem Datensatz für das FEM-Programm ELFE_FE

Durch den Einsatz kommerzieller, allgemeiner FEM-Programme kann das physikalische Ersatzmodell einer Antriebsstruktur praktisch beliebig fein diskretisiert werden. Die Finite-Elemente-Methode wurde z. B. von Arndt (2000, S. 72ff.) und Heisel & Esteban (2002) zur Modellierung einer angetriebenen Stabachse eingesetzt.

Von *Arndt (2000)* werden dabei Kugelgewindespindel, Schutzrohr und Hülse der Stabachse auf ebene, massebehaftete, elastische Balkenelemente reduziert. *Heisel & Esteban (2002)* hingegen modellieren die gleichen Komponenten mit Volumenelementen. Die relevanten Verbindungsstellen wie Spindelmutter, Lagerung und Gelenke werden durch ersetzende Steifigkeiten abgebildet. Ein komplett mit Hilfe der FEM modellierter Vorschubantriebsstrang ist bei *Reinhart u. a. (2001)* zu finden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Abbildung der Übertragungseigenschaften einer Spindelmutter, also der Abbildung des physikalischen Zusammenhangs zwischen Spindeldrehung und Schlittenverschiebung. Weitere Finite-Elemente-Modellierungen von Antriebssträngen findet man bei *Bianchi & Paolucci (1996)* bzw. *Brussel u. a. (2001)* oder *Eubert (1992, S. 47)*.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man mit Hilfe der FEM-Modellierung sehr gute Aussagen bezüglich Eigenfrequenzen und Eigenformen gewinnen kann. Diese gelten jedoch, bedingt durch den zu Grunde liegenden Algorithmus, nur für einen sehr kleinen Bereich um den modellierten Betriebspunkt. FEM-Modelle von Antriebssträngen sind damit zunächst für die Simulation von großen Verfahrbewegungen, wie sie zum Test von NC-Programmen erforderlich sind, nicht geeignet.

4.1.2 Modellbildung im Bereich der Regelung

Störungsbehebung, insbesondere die Beseitigung eines Schwingungsproblems durch Änderungen an der Mechanik, ist in der Regel mit hohen Kosten und langen zeitlichen Verzögerungen verbunden und wird daher im Werkzeugmaschinenbau als letztes Mittel angesehen. Durch die Steuerungs- und Regelungstechnik ist es möglich, das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen zu verbessern, ohne Änderungen an der Mechanik vornehmen zu müssen. Zur Vorherbestimmung der Auswirkungen von optimierten Reglerstrukturen und -parametern oder steuerungstechnischen Maßnahmen findet die Modellbildung in der Steuerungs- und Regelungstechnik ein breites Anwendungsfeld. In der Vergangenheit wurde daher viel Forschungszeit investiert, um die steuerungs- bzw. Regelungstechnischen Ursachen für dynamische Ungenauigkeiten am Tool Center Point zu ergründen. Während auf den Einfluss der Steuerungstechnik in Kapitel 4.1.3 tiefer eingegangen wird, wird der Einfluss der Regelungstechnik im nun folgenden Kapitel behandelt.

Die Aufgabe Regelungstechnischer Maßnahmen besteht in der Optimierung des Führungs- und Störübertragungsverhaltens der lagegeregelten Antriebsachsen. Die Stabilität und Effektivität der Maßnahmen hängt dabei häufig von der Qualität und Realitätstreue der Regelungsmodelle ab. Da die kaskadierte Lageregelung sowohl zur Regelung konventioneller, rotatorischer Antriebe als auch zum Antrieb von Lineardirektantrieben geeignet ist (*Pritschow & Fahrbach 1995*), entstammen die Modelle sowohl dem Bereich der rotatorischen wie auch der Lineardirektantriebe. Daher werden hier Arbeiten aus beiden Bereichen vorgestellt. Ein wesentliches

Merkmal, in dem sich die zahlreichen Modelle unterscheiden, ist das Zeitverhalten, das den Modellen zu Grunde liegt. Moderne, digitale Steuerungen arbeiten in einem fest vorgegebenen Zeitraster. So beträgt die Regelfrequenz im Lageregelkreis bis zu 1 kHz (1 ms) bzw. bis zu 16 kHz (62,5 μ s) im Geschwindigkeits- und Stromregelkreis (*Indramat 1999a; Siemens 1998*). Entsprechend existieren Modelle, die das reale, zeitdiskrete Verhalten abbilden. Andere argumentieren, dass die Abtastzeit, insbesondere in den inneren Regelkreisen von Strom und Geschwindigkeit, gegenüber der kleinsten Zeitkonstanten in der Regelstrecke ($T > 1$ ms) so klein ist, dass für analytische Untersuchungen, z. B. der Bahnabweichungen, ein zeitkontinuierliches Modell der Regelkreisstruktur verwendet werden kann.

Modelle mit zeitkontinuierlichem Regelungsmodell

Zunächst werden Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Regelung unter dem Gesichtspunkt der Entstehung dynamischer Bahnfehler, d. h. mit den Wechselwirkungen zwischen Regelung und Mechanik, beschäftigt haben. Durch nicht lineare Signalübertragung (Spiel, Reibung) im Zusammenhang mit Nachgiebigkeiten in den mechanischen Übertragungselementen verursachte Bahnfehler wurden bereits 1969 von *Augsten* untersucht. *Schmid (1972)* beschäftigte sich anhand eines einfachen Simulationsmodells (Antrieb als Verzögerungsglied zweiter Ordnung) mit der Optimierung der Lageregelung, indem er die dynamische Bahnabweichung beim Umfahren einer Ecke in Abhängigkeit von Verfahrgeschwindigkeit und Achsdynamik untersuchte. Grundlagenarbeit wurde auch von *Frank (2001)* geleistet, der unterschiedliche elektromechanische Vorschubkinematiken miteinander verglich. Untersucht wurden beidseitig fest bzw. fest/los eingespannte Spindeln mit direkt oder indirekt angetriebener Kugelgewindetriebmutter. Dabei stellte er fest, dass Vorschubachsen mit angetriebener Mutter, auf Grund der durch die Einspannung erhöhten Gesamtsteifigkeit, ein hervorragendes Stabilitäts-, Führungs- und Störkraftverhalten aufweisen, was sich auch positiv in der Regelgüte bemerkbar macht. Für die angestellten theoretischen Betrachtungen zieht er das in Abbildung 3-2 dargestellte zeitkontinuierliche Regelungsmodell heran. *Weikert (2000)* betrachtet den Vorschubantrieb von Seite der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung und untersucht Mittel, die zur Beurteilung des Bahnabweichungsverhaltens geeignet sind. Für die durch Simulation aufgedeckten systematischen Abweichungen werden Kenngrößen entwickelt, mit denen die Abweichungen charakterisiert werden können. Die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung war auch Auslöser für die Arbeit von *Gao (2000)*. Er arbeitete an Methoden zur Optimierung der Bewegungsdynamik von Linearmotorfräsmaschinen. Um eine Optimierungsstrategie zur Erhöhung der Bahngenaugkeit bei gleichzeitig hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit durch ganzheitliche Betrachtung aller zusammenwirkenden Achsen zu erarbeiten, untersuchte er die Zusammenhänge unter anderem mit einem Simulationsmodell der kaskadierten Lageregelung.

Modelle mit zeitdiskretem Regelungsmodell

Zeitdiskrete Modellierungen der Antriebsregelung sind bei *Bürgel (2001)*, *Zeller (2001)* oder *Bretschneider (2000)* zu finden. Dabei zeichnet sich insbesondere das Modell von *Bürgel (2001)* durch einen sehr hohen Detaillierungsgrad aus. *Bürgel* verfolgt das Ziel, die antriebsinternen, digitalen Signale zur Prozess- und Maschinenanalyse zu nutzen. Daher modelliert er den permanent erregten Synchronmotor bis ins Detail (Transformation der dreiphasigen Eingangsspannung ins rotorflussorientierte d-, q-Koordinatensystem (*Papiernik 1996*)). *Zeller (2001)* forscht an einem Regelungsmodell im Rahmen seiner Arbeiten bezüglich eines gesamtheitlichen Sicherheitskonzepts der Antriebs- und Steuerungstechnik, um beispielsweise das "Herunterfahrverhalten" einer Motorspindel bei Not-Aus simulieren zu können. Auch *Bretschneider (2000)* benötigt für die Entwicklung eines selbsttätig ablaufenden Entwurfsverfahrens zur optimalen Einstellung der freien Reglerparameter einer kaskadierten Lageregelung ein Modell der geregelten Antriebe.

Obwohl sich die kaskadierte Lageregelung im industriellen Einsatz bewährt hat, so weist sie auch ihre Schwächen auf. Innerhalb der kaskadierten Lageregelung erweist sich die Existenz gering gedämpfter, kritischer Eigenfrequenzen meist als das schwächste Glied (*Fauser 1997, S. 16*; *Rudloff u. a. 1991*). Auf Grund ihrer Struktur kann die kaskadierte Lageregelung die Dynamik derartiger Systeme kaum beeinflussen, wovon die Direktantriebe betroffen sind. Der Einsatz der Zustandsregelung, die neben der eigentlichen Regelgröße auf weitere Zustände der Regelstrecke, wie z. B. die Beschleunigung, zurückgreift, bietet sich hier an (*Seehuber 1994*; *Swoboda 1987*; *Zeller 1997*). Neben der Modellbildung, der Güte der Modellbildung (*Eubert 1992*) und der Empfindlichkeit gegenüber Parameterschwankungen ist es vor allem die aufwendige Inbetriebnahme, die am industriellen Einsatz der Zustandsregelung hindert (*Seehuber 1994*; *Ketterer 1995*). Dennoch weist die Zustandsregelung im Vergleich zur kaskadierten Lageregelung Vorteile auf. Diese werden von *Philipp (1992)* auf der Suche nach praxistauglichen Regelungsstrategien für Lineardirektantriebe systematisch erarbeitet und mit der kaskadierten Lageregelung verglichen. Auch *Zirn (1996)* führt Vergleiche zwischen Zustandsregelung und kaskadierter Lageregelung durch, mit dem Ziel, Grundlagen für den Entwurf von Lineardirektantrieben in der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung zu erarbeiten. Das Ziel der Arbeit von *Brahms* ist die Entwicklung eines Regelungstechnischen Verfahrens zur Kompensation der Kraftwelligkeit von Lineardirektantrieben. Obwohl das neu entwickelte Verfahren auf der Zustandsregelung beruht, wird auch hier das Modell der kaskadierten Lageregelung zum Vergleich herangezogen.

4.1.3 Modellbildung im Bereich der Werkzeugmaschinensteuerung

Wie einleitend vorgestellt, hat die Werkzeugmaschinensteuerung erheblichen Einfluss auf die Bewegungsdynamik. Folglich wird in letzter Zeit auch die Steuerung immer

stärker in den Optimierungsprozess der Bewegungsdynamik mit einbezogen. Dabei gilt es zu bedenken, dass sich die Werkzeugmaschinensteuerung aus den beiden Komponenten NCK und SPS zusammensetzt. Da die SPS nur am Rande Einfluss auf die Bewegungsdynamik hat (z. B. bei Not-Aus, Werkzeugwechsel), wird auf die Modelle zur SPS-Simulation der Vollständigkeit halber hingewiesen. Detaillierte Informationen sind jedoch den jeweiligen Arbeiten zu entnehmen.

4.1.3.1 Modellbildung im Bereich des NCK

Arbeiten, die sich mit steuerungstechnischen Maßnahmen zur Erhöhung der Bewegungsdynamik und Bahngenauigkeit von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen beschäftigen, bilden eine weitere große Gruppe, die für ihre Forschungsarbeiten Modelle benötigt. Ziel steuerungstechnischer Maßnahmen ist es, durch geeignete Modifikation und Anpassung der Führungsgrößen an die physikalischen Gegebenheiten der Maschine, die dynamische Genauigkeit zu verbessern (*Tönshoff u. a. 1997*).

Typische Beispiele für steuerungstechnische Maßnahmen sind die Führungsgrößenglättung und diverse Vorsteuerverfahren. Zu den Verfahren der Führungsgrößenglättung zählen die Bahngeschwindigkeitsführung, z. B. Look Ahead (*Barg & Deisenroth 1995*), und die Glättung unstetiger Bahnübergänge durch Verschleifen. Das Verschleifen kann dabei durch die Einstellung der Schleppfehlergrenze parametriert werden. Beispiele für Vorsteuerverfahren sind die Geschwindigkeitsvorsteuerung und die Beschleunigungsbegrenzung. Ausführliche Untersuchungen hierzu sind bei *Brandenburg & Papiernik (1996)*, *Philipp (1992)* und *Walker (1987)* zu finden. Die Integration inverser Modelle der Antriebsstrecke in die Regelungsstruktur zur Vorsteuerung wurde von *Enselmann (1999)*, *Prasario (1994)*, *Tomizuka (1987)* und *Ye (1992)* untersucht. Von *Prasario* und *Enselmann* werden die inversen Modelle zur Sollbahnkorrektur vor den Interpolator eingekoppelt, während *Ye* und *Tomizuka* Lösungen für die Einkopplung nach dem Interpolator vorstellen.

Für die Untersuchung mehrachsiger, gekoppelter Verfahrbewegungen ist es weiterhin erforderlich, die Lagesollwerterzeugung in die Modelle zu integrieren. In der Regel werden hierzu selbst geschriebene Interpolatoren (*Zeller 2001*), kommerzielle NC-Kinematiksimulationsprogramme oder die von einer realen NC-Steuerung erzeugten und in eine Datei geschriebenen Lagesollwerte (*Gronbach 1999*) verwendet. Auch die Integration eines realen NCK in das Simulationsmodell (Hardware-in-the-Loop Simulation) ist bekannt. Auf Grund der erforderlichen Echtzeitfähigkeit des Modells wird von *Bestle u. a. (1998)* der reale NCK mit einem 3D-Kinematikmodell gekoppelt.

4.1.3.2 Modellbildung im Bereich der SPS

Wie in Abbildung 3-1 dargestellt, ist die SPS Teil der Werkzeugmaschinensteuerung und tauscht mit dem NCK Daten aus. Für spezielle Aufgabenstellungen, wie z. B. zum Test sicherheitsrelevanter Funktionen, die in der Regel mit einer Gefährdung für das Bedienpersonal oder die Maschine (Maschinen-Crash, Abreißen des Werkzeugs usw.) verbunden sind und daher nicht an der realen Maschine durchgeführt werden können, oder zum Test von Werkzeugwechselzyklen, bei denen sehr viel Interaktion zwischen NCK und SPS stattfindet, ist es erforderlich, auch das Verhalten der SPS berücksichtigen zu können.

Bezüglich der reinen SPS-Simulation (die NCK wird vernachlässigt) sind aus der Literatur eine Reihe von Arbeiten bekannt. Die Modelle zur SPS-Simulation zeichnen sich dabei dadurch aus, dass meist die reale SPS mit einem virtuellen Anlagenmodell gekoppelt wird (Hardware-in-the-Loop Simulation) (*Albert 1998; Kohring 1993; Tomaszunas 1998*). Der Fokus dieser Arbeiten liegt auf der echtzeitfähigen Modellierung des Systemverhaltens. Die 3D-Visualisierung des angesteuerten Anlagenmodells ist nicht oder nur mit Einschränkungen möglich. Um dieses Defizit zu beseitigen, arbeitet *Ehrenstrasser u. a. (2002)* an einer Methode, durch die eine reale SPS mit einem 3D-Werkzeugmaschinenmodell gekoppelt werden kann.

4.1.4 Modellbildung des Gesamtsystems Werkzeugmaschine

Die im Folgenden diskutierten Gesamtsystemmodelle sind Synthesen der in den vorangegangenen Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.3 vorgestellten Modelle der Teilsysteme Gestell- und Antriebsmechanik, Achsregelung und Lagesollwerterzeugung. Als Regelungsmodell liegt allen Modellen die kaskadierte Lageregelung als zeitdiskretes oder zeitkontinuierliches Modell zu Grunde. Auch bezüglich der Erzeugung der Führungsgrößen unterscheiden sich die Gesamtsystemmodelle nur unwesentlich. Sie verwenden meist selbsterzeugte Lagesollwertverläufe. Die größten Unterschiede bei den Modellen zur Simulation der Bewegungsdynamik findet man in der Modellbildung der Mechanik. Demzufolge können die Gesamtmaschinenmodelle hinsichtlich der im Bereich der Mechanik eingesetzten Simulationsmethoden in vier Gruppen eingeteilt werden (Tabelle 4-1):

Gruppe I: Mechanik als Finite-Elemente-Modell

Gruppe II: Mechanik als Mehrkörpermodell

Gruppe III: Mechanik als hybrides Mehrkörpermodell

Gruppe IV: Mechanik als 3D-Kinematikmodell

Beispiele für Modelle der ersten Gruppe sind bei *Bianchi & Paolucci (1996), Reinhart u. a. (2001a)* und *Berkemer (1998)* zu finden. Hierbei wird das dynamische

Verhalten der Mechanik durch ein FEM-Modell beschrieben. Diese Forschungsarbeiten zielen darauf ab, die komplexen FEM-Modelle durch Ordnungsreduktion und Transformation in eine Zustandsdarstellung für die Reglerauslegungen zu verwenden.

		Gestellmechanik				
		FEM	MKS mit Starr- körpern	MKS mit flexiblen Körpern	CACE	3D-Kinematik
Antriebsmechanik	FEM	♦Berkemer (1998) ♦Bianchi & Paolucci 1996 ♦Reinhart u. a. 2001A ♦Brussel u. a. 2001				
	MKS mit Starr- körpern		♦Weißen- berger 2001	♦Denkena u. a. 2002 ♦Weißen- berger 2001		
	mit flexiblen Körpern					
	CACE		♦Bestle u. a. 1998 ♦Pritschow u. a. 1999 ♦Weck u. a. 2000	♦Weißen- berger 2001 ♦Gronbach 1999 ♦Feldmann & Christoph 2000	♦Bürgel 2001 ♦Zirm 1996 ♦Gao 2000 ♦Weikert 2000	♦Meier & Kreusch 2000

Tabelle 4-1: Übersicht über die Modellbildung der Mechanik im Bereich der Gesamtmaschinenmodelle

Da die FEM-Beschreibung der Mechanik ein Gleichungssystem hoher Ordnung zur Folge hat, muss das entstandene Gleichungssystem — der besseren Handhabbarkeit der Gleichungen wegen — einer Ordnungsreduktion unterzogen werden. Verfahren zur Ordnungsreduktion können der Literatur (Litz 1979; Varga 1994; Zhou u. a. 1996) entnommen werden. Nach der Ordnungsreduktion liegt die Beschreibung des Bewegungsverhaltens der mechanischen Antriebskomponenten als System- und Eingangsmatrix vor. Diese Matrizen weisen jedoch, im Gegensatz zu den ursprünglich vom FEM-Programm erzeugten Matrizen, eine deutlich kleinere Systemordnung auf.

Auf diese Weise ist es möglich, aus einem FEM-Modell hoher Ordnung über Ordnungsreduktion die Bewegungsgleichungen für ein ähnliches System niedrigerer Ordnung herzuleiten. Problem dieser Vorgehensweise ist, dass die Modelle, auf Grund der den FEM-Algorithmen zu Grunde liegenden Annahmen, nur für einen kleinen Bereich um den betrachteten Betriebspunkt gelten.

Zur Untersuchung der Systemeigenschaften bei großen Verfahrbewegungen, wie es zum Test von NC-Programmen erforderlich ist, findet man in der Literatur daher sehr häufig Modellierungen mit Hilfe der Mehrkörpersimulation. Beispiele für Modelle der Gruppe II sind bei *Großmann (2001)*, *Weck u. a. (2000)* und *Pritschow u. a. (1999)* zu finden. Abweichungen der Simulationsergebnisse vom realen Verhalten verursacht bei diesen Modellen die idealisierte Abbildung der Maschinenkomponenten in Form von Starrkörpern. Da die physikalischen Eigenschaften der Komponenten lediglich durch ihre Masse und Trägheit beschrieben werden, fehlt den Komponenten zunächst die Information über ihre statischen und dynamischen Eigenschaften wie z. B. Bauteilverformung unter Last, Eigenfrequenzen und zugehörige Eigenformen.

Durch die Einbindung flexibler Gestellbauteile in das Mehrkörpermodell ist es möglich, große Verfahrbewegungen und die dabei auftretenden Bauteilbelastungen zu simulieren. Mit Modellen der Gruppe III haben sich *Denkena u. a. (2002)*, *Feldmann & Christoph (2000)*, *Gronbach (1999)* und *Weißberger (2001)* beschäftigt.

Zuletzt noch zu den Modellen der Gruppe IV: Bei ihnen steht die Visualisierung von Verfahrbewegungen zur Kollisionserkennung, NC-Programm-Verifikation und für Machbarkeitsstudien im Vordergrund. Hierzu werden gesamte Maschinenkonfigurationen durch mit Gelenken verbundene Starrkörper nachgebildet. Durch Trägheitskräfte hervorgerufene Effekte werden in der Simulation vernachlässigt, wodurch der Berechnungsaufwand weit unter den Umfang für die Berechnung des dynamischen Verhaltens sinkt (*Meier & Kreusch 2000; Schlägl 2000, S. 17f.*).

4.1.5 Defizite und Handlungsbedarf

Es wurde deutlich, dass im Bereich der Modellbildung von Werkzeugmaschinen bereits eine große Anzahl an Modellen existiert. Durch geeignete Kopplung dieser Modelle oder auch direkt mit Hilfe der vorgestellten Gesamtmaschinenmodelle ist bereits heute die Untersuchung des gekoppelten Bewegungsverhaltens mehrachsiger Verfahrbewegungen möglich. Für einen praxisgerechten Einsatz der Simulationsmodelle als Hilfsmittel und zur Absicherung der Produktentwicklung des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine sind jedoch verschiedene Weiterentwicklungen notwendig:

- Betrachtet man die Modellbildung im Bereich der Mechanik, so fällt auf, dass Informationen, die aus der 3D-Mechanikkonstruktion bereits zur Verfügung stehen, bei der daran anschließenden Modellbildung nicht durchgängig genutzt

werden. So wird beispielsweise der im CAD-System beschriebene kinematische Aufbau der Antriebsmechanik einschließlich der vorhandenen Masse- und Geometrieinformationen nicht direkt in ein MKS-Modell übernommen, sondern ein zweites Mal mit einer CACE-Software modelliert (Tabelle 4-1). Es kommt hinzu, dass die Modellierung mechanischer Zusammenhänge mit Hilfe einer Regelungstechnisch-orientierten Software für den Mechanik-Entwickler meist Schwierigkeiten bereitet. Die Beschreibung der mechanischen Zusammenhänge hat im CACE-System formelmäßig zu erfolgen, während sie mit einer MKS-Software grafisch, interaktiv erfolgt. Und nicht zuletzt kann das Postprocessing eines mit Hilfe einer CACE-Software aufgestellten Modells ausschließlich in Form von 2D-Plots vorgenommen werden. Dreidimensionale Animationen, z. B. von Schwingungen, die gerade im Bereich der Mechanik die Auswertung erleichtern, stehen nicht direkt zur Verfügung.

- Aus der Sicht einer mechatronischen Gesamtsystemmodellbildung fällt auf, dass die Modelle eine unterschiedliche Modellierungstiefe aufweisen. Während von der Mechanik (Mehrkörpermodelle mit flexiblen Körpern) und der Regelung der Vorschubachsen ein sehr detailliertes Abbild aufgebaut wird, wird die Lagesollwerterzeugung meist nur stark vereinfacht berücksichtigt.
- Wie eingangs erwähnt, wurden die Arbeiten meist mit Hinblick auf eine ganz spezielle Aufgabe, z. B. Regleroptimierung, Prozessdiagnose, Optimierung der Mechanik, hin angefertigt. Eine Vorgehensweise, wie mechatronische Gesamtwerkzeugmaschinenmodelle aufzubauen sind, insbesondere in Hinblick auf Durchgängigkeit und Wiederverwendbarkeit der Simulationsmodelle, existiert nicht.
- Die Verwaltung der anfallenden Daten, Modelle und Ergebnisse wurde in den vorgestellten Arbeiten vernachlässigt.

4.2 Integrationskonzepte

Eine weitere Herausforderung der vollständig virtuellen Produktentwicklung mechatronischer Systeme ist, dass verschiedenste Personen an den virtuellen Modellen arbeiten. Dies stellt neue Anforderungen an die systemtechnische Infrastruktur und die Abläufe der Unternehmen. Mit Lösungen, die in diesem Bereich bereits existieren, beschäftigt sich das vorliegende Kapitel.

4.2.1 System- und Datenintegration

Für die Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses und insbesondere für die Verwaltung und Bereitstellung der von den Beteiligten Entwicklern benötigten Daten

sind bereits kommerzielle Lösungen auf dem Markt verfügbar, die datenorientierten PDM- (Product Data Management) und die prozessorientierten EDM- (Engineering Data Management) Systeme. Da sich in der Praxis eine exakte Trennung in reine Prozess- bzw. Datenorientierung als nicht sinnvoll erwiesen hat, spricht man meist von EDM/PDM-Systemen (*Schöttner 1999, S. 93*). Typische Aufgaben von EDM/PDM-Systemen sind die Stamm- und Stücklistenverwaltung, das Dokumentenmanagement, das Projektmanagement, das Konfigurationsmanagement für die Kontrolle über die Zusammensetzung von Baugruppen und Teilefamilien sowie das Viewing und Redlining (Einbringen von Anmerkungen in Dokumente). Dabei steuert es Zugriffsberechtigungen, Bearbeitungszustände, Freigabevorgänge und alle anderen Abläufe, die Auswirkungen auf die Produktdaten haben. (*Abramovici & Bickelmann 1993; Ahle 2000; Eigner & Zagel 2000*). Wie den Funktionen zu entnehmen ist, besteht der Anspruch von EDM/PDM-Systemen darin, den gesamten Produktlebenszyklus zu unterstützen. Hierzu verfolgen die EDM/PDM-Systeme den Ansatz, den Produktentstehungsprozess eines Fertigungsunternehmens mit einem Datenmodell abzubilden, indem sie die einzelnen Entwicklungsteilprozesse mit den zugehörigen Systemen für Konstruktion, Berechnung, Simulation und Dokumentation verbinden. Da die kommerziellen Systeme prinzipiell in den verschiedensten Unternehmen eingesetzt werden können, sind sie zunächst sehr allgemein gehalten. Prinzipiell müssen daher alle kommerziell verfügbaren EDM/PDM-Systeme im Rahmen der Einführung in ein Unternehmen auf die individuellen Bedürfnisse hin optimiert werden. Während dieses "Customizing-Prozesses" werden z. B. die Datenbankstrukturen oder Begrifflichkeiten an das Unternehmen angepasst. Viel wichtiger ist aber die Anpassung der Zugriffsmöglichkeiten auf die vom EDM/PDM-System verwalteten Daten an die unternehmensspezifischen Abläufe. Die Zuordnung von Objekten zu Gruppen und die Zuteilung von Rollen zu Personen (z. B. Entwicklungsleiter, Berechnungsingenieur) sind klassische Funktionalitäten eines EDM/PDM-Systems hierfür. Durch die Kombination von Gruppen und Rollen lassen sich beliebige Sichten (funktionsorientiert, montageorientiert, projektleiterorientiert, CAD-orientiert) auf die Daten generieren. Ein wichtiger Schlüsselfaktor für die erfolgreiche EDM/PDM-Einführung in ein Unternehmen liegt daher in der geeigneten Anpassung des System an die individuellen Unternehmensabläufe (*Kelch 1998*).

4.2.2 Methoden zur interdisziplinären Werkzeugmaschinenentwicklung

Im Gegensatz zu den kommerziellen Lösungen, bei denen die Systemtechnik im Vordergrund steht, liegt ein wesentlicher Fokus im Bereich der Forschung auf der methodischen Integration der EDM/PDM-Systeme in die produktionstechnischen Unternehmensabläufe. Dies geschieht mit dem Ziel, die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Mitarbeiter zu verbessern.

So beschäftigte sich beispielsweise das Projekt MATCAP (*Reinhart u. a. 1998*) unter anderem mit Methoden und Abläufen zur Integration eines PDM-Systems in den Produktentwicklungsprozess. Die Umsetzbarkeit des in MATCAP für die Werkzeug-

maschinenentwicklung erarbeiteten Konzepts wurde durch die Anbindung eines 3D-CAD-, Elektro-CAD-, Installationsplanungs-, Kostenschätzungs- und FEM-Programms an ein kommerzielles PDM-System nachgewiesen.

Ziel des iViP-Projekts war die Entwicklung neuer, innovativer Methoden und Werkzeuge für die virtuelle Produktentstehung auf Basis einer offenen Systemarchitektur (*Krause u. a. 2001*). Der Fokus lag hier auf der Unterstützung der verteilten Produktentwicklung. Als Integrationswerkzeuge dienen die so genannte iViP-Integrationsplattform sowie der iViP-Client. Die iViP-Integrationsplattform stellt Basisdienste für die Integration beliebiger Softwaremodule zur Verfügung. Der iViP-Client ist die einheitliche, plattformübergreifende Benutzerschnittstelle für iViP konforme Werkzeuge. Darüber hinaus können über den iViP-Client externe Werkzeuge gestartet werden, die dann in ihrer Stand-alone-Umgebung laufen. Somit wird die Zusammenarbeit der verschiedensten Personen über eine einheitliche Oberfläche an einem gemeinsamen virtuellen Modell möglich.

Im Rahmen des Verbundprojekts Entwicklungsumgebungen Mechatronik (EUMECH) (*Gausemeier & Lückel 2000*) wurde eine Entwicklungsumgebung für mechatronische Systeme erarbeitet. Sie gibt Vorschläge bezüglich Entwicklungsmethodik, Modellbildung sowie System- und Datenintegration. Bezuglich der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme wird z. B. von *Lückel u. a. (2000)* ein Vorgehen vorgeschlagen, das auf der Hierarchisierung der Funktionsstruktur des zu entwickelnden mechatronischen Systems beruht. Die Basis der Hierarchisierung bilden so genannte „Mechatronische Funktionsmodule“, die aus einer Tragstruktur, Sensoren, Aktoren und einer lokalen Informationsverarbeitung bestehen. Diese lassen sich durch informationstechnische bzw. mechanische Kopplung zu „Autonomen Mechatronischen Systemen“ Verknüpfung. Die Autonomen Mechatronischen Systeme stellen ihrerseits die Grundelemente für die Systeme der nächst höheren Ebene dar, die „Vernetzten mechatronischen Systeme“ dar. Der Bezug zur Realität wurde durch Erstellung von Entwicklungsumgebungen für die drei Produktklassen Feinwerktechnik, Hochleistungshydraulik und servohydraulische Prüfeinrichtungen hergestellt.

Eine weitere Arbeit über System- und Datenintegration ist von *Wuttke (2000)* bekannt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Unterstützung des Modellbildungs- und Simulationsprozesses. *Wuttke* beschreibt eine Vorgehensweise zur effizienten Planung und Abwicklung von Simulationsprojekten, und dies mit dem Ziel der Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen. Das System ist sehr modular angelegt. Zunächst werden für beliebige Teilbereiche so genannte Modell-Management-Systeme aufgebaut. Aufgabe des übergeordneten Simulations-Management-System SiMaS ist es, die Modell-Management-Systeme durch Funktionalitäten wie Produkt- und Prozessdatenmanagement, Modell-Management und Wissensmanagement zu einem Gesamtsystem zu vereinen. SiMaS verbindet dabei bisher ein MMS aus dem Anwendungsbereich Materialfluss und Logistik sowie ein MMS für den Bereich Robotik.

Im Vordergrund der folgenden Arbeiten steht die Beschreibung von Produktstrukturen und funktionalen Zusammenhängen. So bestand eine wesentliche Zielsetzung des Verbundprojekts STEP-Datenmodelle zur Simulation mechatronischer Systeme (MechaSTEP) auf der Entwicklung eines ISO 10303- (STEP-) basierten Datenmodells (Mason 2002) zur Abbildung mechatronischer Systeme. Das Projekt konzentrierte sich auf den Austausch simulationsrelevanter Daten aus den Bereichen der Mehrkörper-, Hydraulik-, Elektrik-, Elektronik- und Regelungssimulation auf Basis genormter Daten (MechaSTEP 2002).

Schlögl (2000) beschäftigt sich in seiner Arbeit mit dem integrierten Simulationsdatenmanagement für die maschinennahe Simulation. Kern seines Datenmanagements ist ein Referenzmodell, das je nach Aufgabenstellung eine Daten-, eine Prozess- und eine Ressourcensicht enthält. Alle im Rahmen der Entwicklung von Maschinen- und Anlagen anfallenden Daten können mit Hilfe dieses Referenzmodells abgelegt werden. Besonderes Ziel ist es, durch das neue Referenzmodell die Schnittstelle zwischen Maschinenhersteller und Anlagenbetreiber zu verbessern. Das System wurde insbesondere für die Ablaufsimulation ausgearbeitet.

Sanft (1995) verknüpft ein zentrales Datenverwaltungssystem, ein Datenbanksystem, ein CAD-System, ein Simulationssystem sowie Berechnungs-, Auslegungs- und Optimierungsprogramme. Als Basis für die Integration wurde ein Produktmodell entwickelt, in dem sämtliche im Entwicklungsprozess anfallenden Daten verwaltet werden können. Zur methodischen Vorgehensweise wird der klassische, in der VDI-Richtlinie 2221 beschriebene Arbeitsablauf herangezogen. Auf Grund der damals weiten Verbreitung von UNIX-Workstations im Entwicklungsbereich wurde das System auf einer UNIX-Plattform implementiert.

Der Ansatz von *Anton u. a. (2002)* zur Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit besteht darin, das zu entwickelnde System während des Entwicklungsprozesses in Form eines fachbereichsübergreifenden Funktionsmodells zu beschreiben. Dieses bildet die wesentlichen Elemente und Eigenschaften des zu entwickelnden Systems ab und ist die Basis für die späteren, fachbereichspezifischen Schritte im Entwicklungsprozess. Die Notation ist hardware- und lösungsunabhängig und unterstützt so die Konzeption, die nicht von einer Fachdisziplin dominiert wird. Kern der Informationsverwaltung bildet ein integriertes, objektorientiertes Produktmodell. Das Produktmodell wird auch hier von einem PDM-System verwaltet. Das Bindeglied zwischen der Methode und dem PDM-System ist der so genannte "Mechasoft Modeller", eine grafische Benutzeroberfläche zur Funktionsmodellierung und Visualisierung der vorhandenen Informationen.

Und auch *Pühl (1999)* beschreibt eine Methode zur Unterstützung der interdisziplinären Produktentwicklung. Sein Ansatz, um alle an einem Projekt beteiligten Personen inhaltlich zusammenzuführen, beruht auf der Zusammenfassung der eine Komponente beschreibenden Informationen zu so genannten Konstruktionsobjekten. Dies ist eine Erweiterung zu den bis dato existierenden EDV-Lösungen, die die Vernetzung dadurch erreichen wollten, dass sie nur Dokumente zueinander in

Beziehung setzen. Mit Hilfe der Konstruktionsobjekte können beliebige Produkte in Form von Produktstrukturen beschrieben werden. Systemtechnisch wird die Methode durch das von ihm entwickelte "Engineering Object Management System" unterstützt.

4.2.3 Defizite und Handlungsbedarf

Wie die Zusammenstellung des Stands der Forschung und Technik zu diesem Themengebiet zeigt, haben und beschäftigen sich immer noch zahlreiche Arbeiten mit einer Entwicklungsmethodik für die durchgehende virtuelle Produktentwicklung und deren systemtechnischer Unterstützung. Nachteil dieser Arbeiten ist, dass in der Regel eine allgemein gültige Vorgehensweise für die virtuelle Produktentwicklung mechatronischer Systeme beschrieben wird. Die Methoden sind damit zwar prinzipiell für die Entwicklung von Werkzeugmaschinen anwendbar, bedürfen auf Grund ihrer Allgemeingültigkeit jedoch noch erheblichen Aufwands für die gezielte Anpassung auf die Auslegung von Werkzeugmaschinen. Die Modellbildung wird dabei meist nur hinsichtlich der Informationsbereitstellung und Datenverwaltung der während der Modellbildung benötigten und anfallenden Daten behandelt. Der durchgängige Aufbau der verschiedenen Simulationsmodelle wird nicht betrachtet.

4.3 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Auslegung des gekoppelten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen mit Hilfe der Simulation eine Vielzahl von Methoden aus den unterschiedlichsten Teilbereichen existieren. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der zu Grunde liegenden Theorie (d'Alembert, Lagrange usw.) und der damit verbundenen mathematischen Beschreibungsform (Differentialgleichung, Zustandsraumdarstellung usw.), der Simulationswerkzeuge (MKS, CACE usw.), die die mathematische Beschreibung erleichtern, und nicht zuletzt der eingesetzten Hardware (PC, UNIX, Echtzeitbetriebssystem, reale NC-Steuerung usw.). Die Modelle und damit die Modellbildungsmethodik wurden im Rahmen dieser Arbeiten meist sehr spezifisch auf eine Aufgabenstellung hin ausgerichtet und optimiert. Eine Modellbildungsmethodik, die auf die speziellen Anforderungen der mechatronischen Auslegung mehrachsiger, gekoppelter Verfahrbewegungen zugeschnitten ist, existiert nicht. Ein durchgängiges Konzept, von der Datenhaltung über den Modellaufbau bis hin zum Simulationsmanagement, ist folglich für die Untersuchung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen noch zu erarbeiten.

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle

Vor dem Hintergrund der in den vorausgegangenen Kapiteln aufgezeigten Defizite soll das Konzept eines neuen Vorgehens zum Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle entwickelt werden. Hierzu wird zunächst die Problemstellung gezielt herausgearbeitet. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an die neue Vorgehensweise formuliert und im Anschluss daran wird das Konzept der neuen Vorgehensweise vorgestellt.

5.1 Problemfokussierung

Trotz der besonderen Anforderungen an die Auslegung mechatronischer Systeme wird die Werkzeugmaschinenentwicklung heute immer noch von der Mechanik dominiert (*Genderka 1995, Hahn 1999*). Daher ist die Simulation vor allem in diesem Bereich sehr verbreitet, was durch die große Anzahl der vorhandenen und zur Anwendung kommenden Simulationsmethoden bestätigt wird (vgl. Kapitel 3.4). So finden zur Auslegung des Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen in der Mechanik CAD-Systeme, Kinematiksimulations-, FEM- und MKS-Programme Anwendung, während z. B. in der Elektrotechnik für die Analyse der Regelung fast ausschließlich die blockorientierten CAE-Programme zur Anwendung kommen. Die Nachbildung z. B. der Erzeugung der Lageführungsgrößen der Bewegungssachsen erfolgt mit allgemeinen Programmiersprachen wie Visual Basic oder C++. Entsprechend häufig wird die Mechanik in unterschiedlichen Programmen modelliert, was vermuten lässt, dass hierbei redundante Arbeit geleistet wird und daher gerade im Bereich der Modellbildung der Mechanik ein großes Potenzial zur Effektivitätssteigerung anzutreffen ist. Daher wird im Folgenden die mechanische Modellbildung ausführlich untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Vorgehensweise bei der Modellbildung.

Unter Modellbildung oder Modellierung wird in Anlehnung an *Banks (1998)* die Gesamtheit der Arbeitsschritte verstanden, die erforderlich sind, um von einem realen oder gedanklichen System zu einem experimentierbaren, virtuellen Modell zu gelangen. Im engeren Sinn wird der Begriff "Modellbildung" häufig zur Beschreibung der Phase verwendet, in der das Modell in der jeweiligen Software implementiert wird. In diesen beiden Bedeutungen wird der Begriff im Folgenden verwendet. Die Bedeutung wird jeweils aus dem Zusammenhang ersichtlich.

5.1.1 Simulationsmethodenspezifische Modellbildung im Bereich der Mechanik

Zentrales Entwicklungswerkzeug im Bereich der Mechanik ist das 3D-CAD-System. Der mit dem CAD-System erstellte Systementwurf ist Grundlage für die Ableitung der

unterschiedlichen mechanischen Berechnungsmodelle. Ausgehend von dem CAD-Systementwurf erfolgt der Aufbau der Simulationsmodelle. Hierzu wird zunächst das CAD-Modell simulationsmethodenspezifisch aufbereitet. Hierzu zählt z. B. das Löschen nicht benötigter Konstruktionselemente, das Anbringen von Koordinatensystemen, die für die spätere Modellbildung benötigt werden, und die Umgruppierung von Baugruppen. Ausgehend von diesen simulationsmethodenspezifischen Ausprägungen des CAD-Modells werden die für die Modellbildung benötigten Daten abgeleitet (Abbildung 5-1). Diese Neustrukturierung wird von jedem Berechnungsingenieur durchgeführt, unabhängig davon, ob ein anderes Modell auf den in dieser Form erzeugten Daten aufbauen kann oder ob die Daten bereits aus einem anderen Modell existieren. Die Folge sind redundante und/oder inkonsistente Daten, für deren Generierung unnötige Zeit verloren geht. Diese simulationsmethodenspezifische Modellbildung soll im Folgenden genauer analysiert werden.

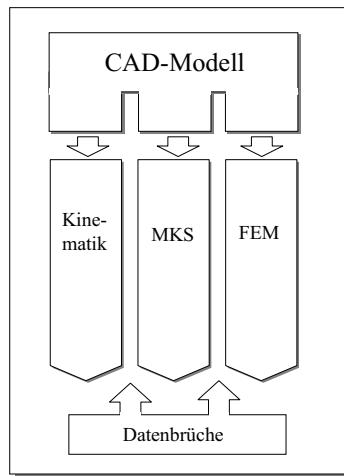


Abbildung 5-1: Simulationsmethodenspezifischer Modellbildungsprozess im Bereich der Mechanik

5.1.1.1 Finite-Elemente-Methode

Die Arbeitsschritte eines FEM-Modellbildungsprozesses sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Zunächst wird der Systementwurf hinsichtlich der relevanten physikalischen Zusammenhänge analysiert. Ausgehend von dieser Analyse erfolgt die Aufspaltung des Systementwurfs in einzelne Körper. Im Anschluss daran müssen für die Beschreibung der Verbindungen zwischen den Körpern (z. B. Linearführung,

Verschraubung) vordefinierte Finite-Elemente ausgewählt werden, die das Verhalten in den Koppelstellen beschreiben. Ein geeignetes Hilfsmittel zur Dokumentation der aus diesen Arbeitsschritten entstehenden Modellstruktur ist das so genannte Topologiediagramm (Abbildung 5-2).

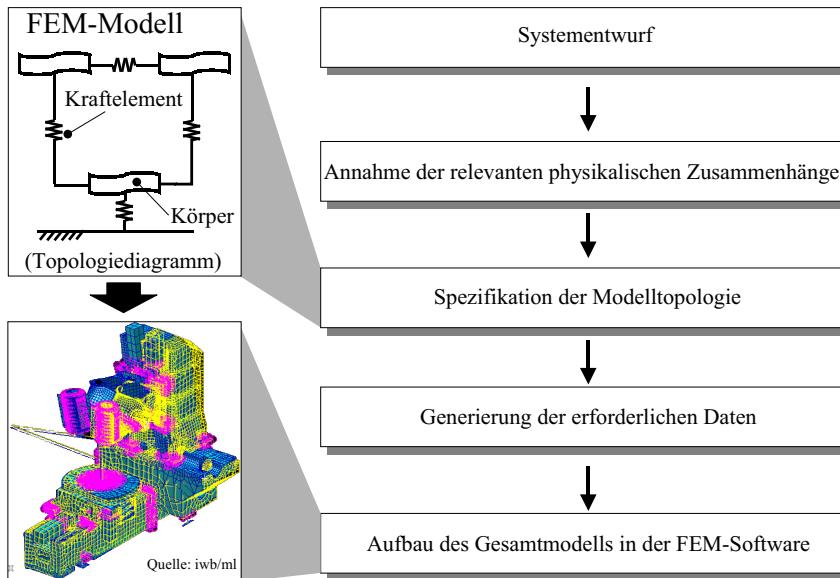


Abbildung 5-2: Arbeitsschritte des FEM-Modellbildungsprozesses

Auf Basis des Topologiediagramms erfolgt die Generierung der für den Modellaufbau in der FEM-Software benötigten Daten. Als Beispiele hierfür seien die Beschreibung der Materialeigenschaften der Körper sowie die Vernetzung der Körper genannt. Vernetzung bezeichnet den Arbeitsschritt, in dem der zu berechnende Körper in die Finiten Elemente zerlegt wird. Dies hat unter Berücksichtigung der Koppelstellen zu erfolgen, über die später die einzelnen Körper durch Kraftelemente miteinander verbunden werden, d. h. an den Koppelstellen muss ein Knoten des FEM-Netzes zu liegen kommen. An die Generierung der Daten schließt sich der Aufbau des Gesamtmodells in der FEM-Software an. Dieser umfasst neben der Implementierung der Körper in der Software, die Kopplung der Körper durch die Kraftelemente sowie die Definition von Randbedingungen (äußere Lasten, kinematische Zwangsbedingungen) (Albertz 1995, Meinlschmidt & Zamazal 1999).

5.1.1.2 Mehrkörpersimulation mit Starrkörpern

Der MKS-Modellbildungsprozess ist in Abbildung 5-3 illustriert. Die prinzipielle Reihenfolge der Arbeitsschritte ist mit der FEM identisch. Auch hier werden für den Systementwurf zunächst Annahmen hinsichtlich der physikalischen Zusammenhänge getroffen. Daraufhin erfolgt die Aufspaltung des Systementwurfs in einzelne Körper. Diese werden wiederum durch vordefinierte Elemente — Gelenke und Kraftelemente — so miteinander verbunden, dass das Ersatzmodell das reale Verhalten entsprechend des geforderten Detaillierungsgrads korrekt beschreibt.

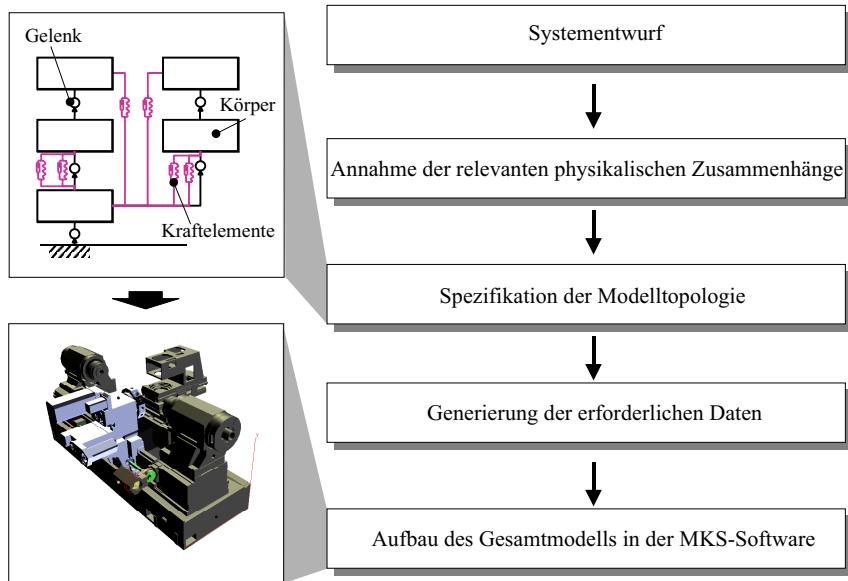


Abbildung 5-3: Arbeitsschritte des MKS-Modellbildungsprozesses

Hilfsmittel zur Dokumentation der Modellstruktur ist auch hier das Topologie-Diagramm. Das Topologie-Diagramm beinhaltet alle wichtigen Informationen für den nun anschließenden softwaregestützten Modellaufbau, wie die kinematische Kette (Reihenfolge in der die Starrkörper durch Gelenke miteinander verbunden sind), Gelenk-, Kraftelement- und Sensorangriffspunkte und den Gelenk- und/oder Kraftelementtyp (Abbildung 5-4). Im Anschluss hieran erfolgt wiederum die Generierung der für die Modellbildung benötigten Daten. In der MKS umfasst die Modellierung der Körper die geometrische Beschreibung der Körper inklusive der Lage der Koppelstellen sowie die Beschreibung des Starrkörperverhaltens durch

Masse, Trägheitstensor und Lage des Schwerpunkts. Ausgehend von den einzelnen Körpern erfolgt anhand des Topologie-Diagramms der Aufbau des Gesamtmodells. Auch in der MKS-Software erfolgt die Definition der Koppellemente (Kraftelemente, Gelenke, Sensoren usw.) grafisch interaktiv durch die Anwahl der entsprechenden Koppelstellen auf den zu verbindenden Körpern.

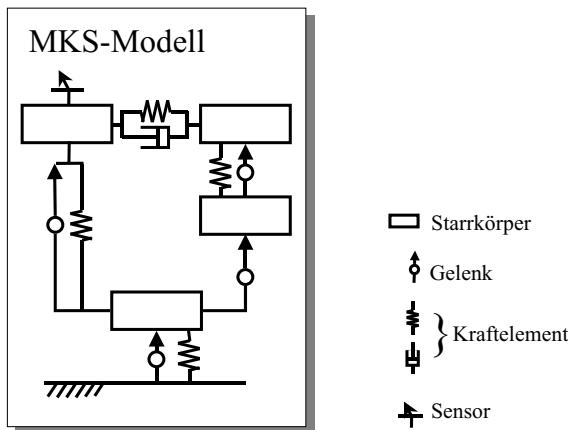


Abbildung 5-4: Topologie-Diagramm eines MKS-Modells

5.1.1.3 Mehrkörpersimulation mit flexiblen Körpern

Die Einbindung eines Körpers als flexiblen Körper in das MKS-Modell setzt die Existenz eines Standard Input Data Datensatzes (SID Datensatz) von diesem Körper voraus. Der SID Datensatz beschreibt die flexiblen Eigenschaften des Körpers in Form eines für MKS-Systeme einlesbaren, neutralen Datenformats. Die Beschreibung des flexiblen Bauteilverhaltens erfolgt durch eine modale Approximation, d. h. durch die Beschreibung des Bauteils durch seine Eigenformen und zusätzliche statische und dynamische Moden, so genannte Frequency Response Modes (FRM). Die Eigenformen beschreiben das Verhalten des eigenständigen, d. h. aus dem Gesamtsystem herausgelösten, Körpers. Der Berechnung liegt dabei zu Grunde, dass die Freiheitsgrade des Knotens, über den der Körper später in Form eines Gelenks in das MKS-Modell eingebunden wird, an die Freiheitsgrade dieses Gelenks angepasst wurden. Mit Hilfe der FRMs kann das dynamische Verhalten des Körpers entsprechend der realen Randbedingungen berücksichtigt werden. Ein Anwendungsbeispiel hierfür ist die Modellbildung einer Linearführung, bei der sich der Kraftangriffspunkt der einen gegenüber der anderen Komponente mit der Zeit ändert.

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle

Das unterschiedliche physikalische Verhalten der Komponente mit dem veränderlichen Kraftangriffspunkt kann mit Hilfe der FRMs berücksichtigt werden.

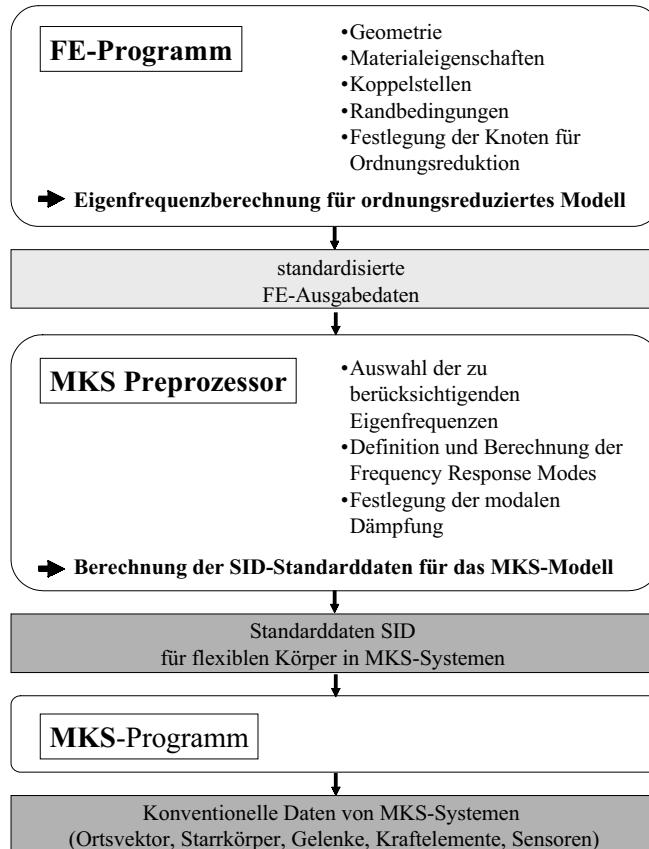


Abbildung 5-5: Prozesskette zur Ableitung der Daten für einen flexiblen Körper in der MKS aus den FEM-Daten

Die Erzeugung des SID Datensatzes beginnt mit der Erzeugung des FEM-Modells des Körpers in einem Standard FEM-Programm (Abbildung 5-5). Hierbei gilt es zu beachten, dass die Stellen, an denen später im MKS-Modell ein Koppelpunkt definiert werden soll, mit einem Knoten des FEM-Netzes zusammenfallen. Zudem müssen die Freiheitsgrade des Knotens, über den der Körper später in Form eines Gelenks in das MKS-Modell eingebunden wird, mit den Freiheitsgraden dieses Gelenks abgeglichen

werden. Dies ist durch die Definition entsprechender Randbedingungen in diesem Knoten möglich. Da FEM-Modelle in der Regel über sehr viele Knoten und infolgedessen über sehr viele Freiheitsgrade verfügen, muss die Struktur einer Ordnungsreduktion unterzogen werden. Dies ist erforderlich, damit die Struktur für das MKS-Programm handhabbar wird. Die hierfür in der Regel herangezogene Ordnungsreduktion nach Guyan (*s. Klein 2000*) erfordert einen Satz repräsentativer Knoten, auf die das Ausgangsmodell reduziert wird. Diese gilt es weiterhin zu spezifizieren. Wurde das FEM-Modell unter Beachtung dieser Regeln erzeugt, kann der FEM-Solver gestartet werden. Ergebnisse des Berechnungslaufs sind die Eigenfrequenzen des reduzierten Bauteils, die — bei erfolgreicher Reduktion — mit den Eigenfrequenzen des Ausgangsteils übereinstimmen; und dies trotz reduzierter Knotenzahl. Weitere Ausgabedaten sind die Massen- und Steifigkeitsmatrix des Körpers sowie die Koordinaten der Knoten. Diese Ausgabedaten können von einem speziellen MKS-Preprozessor eingelesen und von diesem unter Anwendung von Ansatzfunktionen zu dem SID Datensatz weiterverarbeitet werden.

Auch hierfür sind jedoch zuvor noch einige Vorbereitungen zu treffen. Mit Hilfe der Frequency Response Modes können die auf das Bauteil wirkenden statischen und dynamischen äußeren Kräfte berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der FRMs kann dabei prinzipiell auf zwei Arten erfolgen: Zum einen können sie in Form von Einheitskräften bereits im FEM-Modell berücksichtigt werden. Das hat zur Folge, dass der äußere Krafteinfluss auch nur für diese Stelle korrekt berechnet wird. Will man beispielsweise eine Linearführung modellieren, bei der sich der Kraftangriffspunkt am Bauteil mit der Zeit ändert, so sind für alle Knoten, an denen ein Kraftangriff erfolgen kann, mit Hilfe der FEM die zugehörigen FRMs zu berechnen (*Weck u. a. 2001; Weißenberger 2001*). Da jede FRM-Berechnung eine eigene FEM-Berechnung erfordert, ist dies mit relativ viel Aufwand verbunden. Im Rahmen der Arbeit wurde daher die zweite Variante, die Berechnung der FRMs mit dem MKS-Preprozessor, angewandt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass alle zu berücksichtigenden FRMs im Laufe einer SID Berechnung berechnet werden können. Im Gegensatz zu der ersten Variante muss damit nicht für jeden FRM eine eigene SID Berechnung durchgeführt werden.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass auch die Einbindung des flexiblen Körpers in das MKS-Modell, d. h. die Definition von Koppellementen zwischen dem flexiblen Körper und einem benachbarten Körper, über die Anwahl von Koppelstellen erfolgt.

5.1.1.4 Kinematiksimulation

Wie mit der Mehrkörpersimulation können auch mit der Kinematiksimulation große, räumliche Bewegungen von Körpern simuliert werden. Im Gegensatz zur MKS liegt bei der Kinematiksimulation der Fokus jedoch auf der Animation der Verfahrbewegung mehrerer Körper unter Berücksichtigung möglicher Kollisionen. Vom

Modellaufbau her betrachtet stellt das Kinematiksimulationsmodell ein stark vereinfachtes MKS-Modell dar. So erfolgt die Modellbildung analog zur MKS-Modellbildung, jedoch mit dem wesentlichen Unterschied, dass als Koppellemente zwischen zwei Körpern ausschließlich Gelenke zur Verfügung stehen. Auf Grund der rein kinematischen Untersuchungen werden auch für die Beschreibung der Körper wesentlich weniger Daten benötigt. So ist ein Körper für die Kinematiksimulation durch seine Geometrie und die Lage des Gelenkankoppelpunkts vollständig beschrieben.

5.1.1.5 Gegenüberstellung der Modellbildungsmethoden

Der Vergleich der Modellbildungsprozesse weist folgende Übereinstimmungen auf: Kern der Modellbildung ist die Spezifikation der Modelltopologie. Eine geeignete Form der Notation ist das so genannte Topologie-Diagramm, ein Netz bestehend aus Körpern und deren Verbindungselementen (Abbildung 5-6).

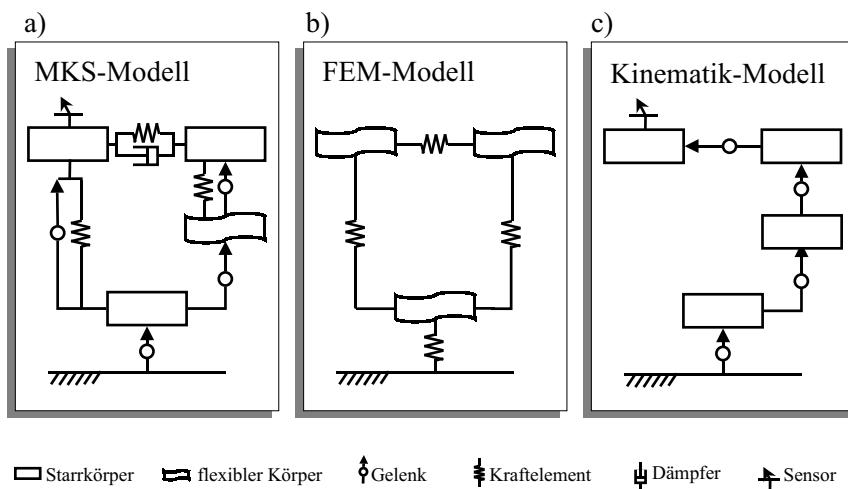


Abbildung 5-6: Topologiediagramme unterschiedlicher mechanischer Sichten auf dasselbe reale System

Die Körper repräsentieren die Bauteile bzw. Baugruppen des Systems. Die Verbindungselemente beschreiben das physikalische Verhalten in den Koppelstellen mit Hilfe von Gelenken und/oder Kraftelementen. Modellinterne Zustandsgrößen können durch Sensoren erfasst werden. Der Angriffspunkt der Verbindungselemente bzw. Sensoren auf den Körpern wird durch Koppelpunkte festgelegt. Anstelle des Begriffs "Koppelpunkt" bzw. "Koppelstelle" ist in CAD- und Kinematik-

simulationssystemen der Begriff "Koordinatensystem", in FEM-Programmen der Begriff "Knoten" und in den MKS-Programmen der Begriff "Marker" gebräuchlich.

Daten	CAD	Kinematik-simulation	Modelle		
			MKS		
			Starr-körper	flexible Körper	FEM
Geometrie (neutrales Format)	O	I	I	I	I
Materialkennwerte (Dichte, E-Modul, Querkontraktionszahl usw.)	I			I	I
Steifigkeitsmatrix				I	O
Massenmatrix				I	O
Dämpfungsmatrix				I	O
Masse	O		I	I	O
Trägheitstensor	O		I	I	O
Lage des Schwerpunkts	O		I	I	O
Lage der Koppelpunkte	I, O	I, O	I, O	I, O	I, O
FEM-Netz	O			I	I, O
Eigenfrequenzen und -formen				I	O
Frequency Response Modes				I	O

Tabelle 5-1: Überblick über die für die Modellbildung der Körper in den verschiedenen Programmen benötigten Daten (Input) und deren Herkunft (Output)

Jeder Körper bildet eine Verzweigungsstelle. Dabei ist jeder Körper eines Modells über mindestens eine Verbindung mit einem anderen Körper verbunden. Außerdem ist es möglich, dass mehrere Verbindungselemente an derselben Koppelstelle eines Körpers angreifen (Abbildung 5-6a). Da die Marker in der Regel im CAD modelliert und von hier in die spezifischen Simulationsprogramme übernommen werden, ist die

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle

Vereinheitlichung der für die Modellierung einer Koppelstelle erforderlichen Marker ein Ansatzpunkt zur Reduzierung des Modellbildungsaufwands.

Vergleicht man weiterhin die für Beschreibung der Körper mit Hilfe der verschiedenen Simulationsmethoden (CAD-, MKS-, FEM-, Kinematik-Modell) erforderlichen Daten, so stellt man fest, dass eine Vielzahl der benötigten Daten identisch ist und den gleichen Ursprung hat. In Tabelle 5-1 wurden die Daten zusammengetragen, die für die Beschreibung der Körper in den unterschiedlichen Programmen erforderlich sind. Als Beispiel für die Datenredundanz sei die visuelle Darstellung der Körper in den verschiedenen Simulationsprogrammen angeführt. Die hierfür verwendete Volumen-geometrie wird in der Regel in Form eines neutralen Datenformats von einem 3D-CAD-Modell abgeleitet. Diese kann prinzipiell für das Kinematik-, das MKS- und das FEM-Modell genutzt werden.

Daten		Modelle				
		CAD	Kinematik-simulation	MKS		
Koppel-stellen	Steifigkeiten			X	X	X
	Dämpfungen			X	X	X
	Freiheits-grade		X	X	X	X
	Überset-zungs-verhältnis		X	X	X	X
Randbe-dingungen	Kräfte, Momente, Geschwin-digkeiten usw.		X	X	X	X
global	Gravitation		X	X	X	X

Tabelle 5-2: Übersicht über die Parameter, die für den Aufbau der simulationsmethodenspezifischen Gesamtmodelle benötigt werden

Die Vielzahl redundanter Daten wird auch beim Aufbau der simulationsmethodenspezifischen Gesamtmodelle sichtbar. Auch hier sind übereinstimmende Daten in der Beschreibung der Koppelstellen, der Randbedingungen und den globalen Modellparametern zu finden (Tabelle 5-2).

Diese Gemeinsamkeiten führen zu dem Schluss, dass durch Vereinheitlichung der Systemgrenzen und Schnittstellen einmal generierte Daten in unterschiedlichen Simulationsmodellen wiederverwendet werden können. Hierdurch wird die Erzeugung redundanter Daten vermieden und letztendlich die Effektivität der Modellbildung gesteigert. Dies ist ein Ansatzpunkt, der in der neuen Methode Berücksichtigung finden wird.

5.1.2 Modellbildung mechatronischer Modelle

Unter mechatronischen Modellen werden Simulationsmodelle verstanden, die im Gegensatz zu den simulationsmethodenspezifischen Modellen Systeme betrachten, deren Funktionalität durch das Zusammenwirken mehrerer Fachbereiche (Bahnerzeugung — Informationsverarbeitung, Regelung — Elektronik, Antriebs- und Gestellmechanik — Mechanik) zu Stande kommt. Eine Abteilung, die verstärkt mit mechatronischen Modellen zu tun hat, ist die Elektrokonstruktion. Typische Aufgabenstellungen im Bereich der Elektrokonstruktion sind die Auslegung der Antriebe, also die Auswahl geeigneter Antriebsmotoren im Zusammenspiel mit der Antriebsmechanik, sowie die Analyse des dynamischen Verhaltens der Antriebe unter Einbeziehung der Regelung. Auch die NC-Programmierung gehört zur Aufgabe der Elektrokonstruktion. Für die Bearbeitung dieser Aufgabenstellungen sind Modelle erforderlich, die mechanische, elektronische und informationsverarbeitende Teilsysteme der Werkzeugmaschine in einem Modell vereinen. Im Gegensatz zu den fachbereichsspezifischen Systemen, für deren Analyse es eine Vielzahl von Simulationsprogrammen gibt, stehen für die fachbereichsübergreifenden Modelle nur wenige Spezialprogramme zur Verfügung. Diese sind z. B. auf die Bearbeitung spezieller Aufgabenstellungen, wie die Auslegung der Antriebsmechanik in Verbindung mit der Regelung, ausgerichtet. Oder sie erlauben den Aufbau mechatronischer Modelle in einer Software (*Lückel u. a. 2001*), wobei jedoch in der Regel Einschränkungen im Hinblick auf den Detaillierungsgrad der fachbereichsspezifischen Modelle hingenommen werden müssen (Mechanik kann z. B. nur als Starrkörpersystem betrachtet werden). Da die Programme einerseits zusätzliche Kosten verursachen andererseits aber nicht verhindern, dass auf andere Programme verzichtet werden kann, finden sie bisher im Werkzeugmaschinenbau kaum Anwendung.

Daher werden heute zur Bearbeitung mechatronischer Aufgabenstellungen die Standardsimulationsprogramme herangezogen. Abbildung 5-7 gibt einen Überblick über typische, mit Standardsoftware aufgebaute, mechatronische Simulationsmodelle. So werden für die Analyse des geregelten Vorschubantriebs CACE-Programme und für die NC-Simulation Kinematiksimulationsprogramme eingesetzt. Wie der Abbildung 5-7 zu entnehmen ist, kommt es dabei zu Überschneidungen hinsichtlich der modellierten Teilsysteme. So muss z. B. die Mechanik in allen Programmen modelliert werden. Weitere Überschneidungen sind auch bei der Erzeugung der Lageführungsgröße zu erkennen. Die Funktionalität des Interpolators wird einmal in

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle

der NC-Simulation mit Hilfe des Kinematiksimulationsprogramms benötigt. In bestimmten Fällen muss die Interpolatorfunktionalität aber auch in der CACE-Software nachgebildet werden.

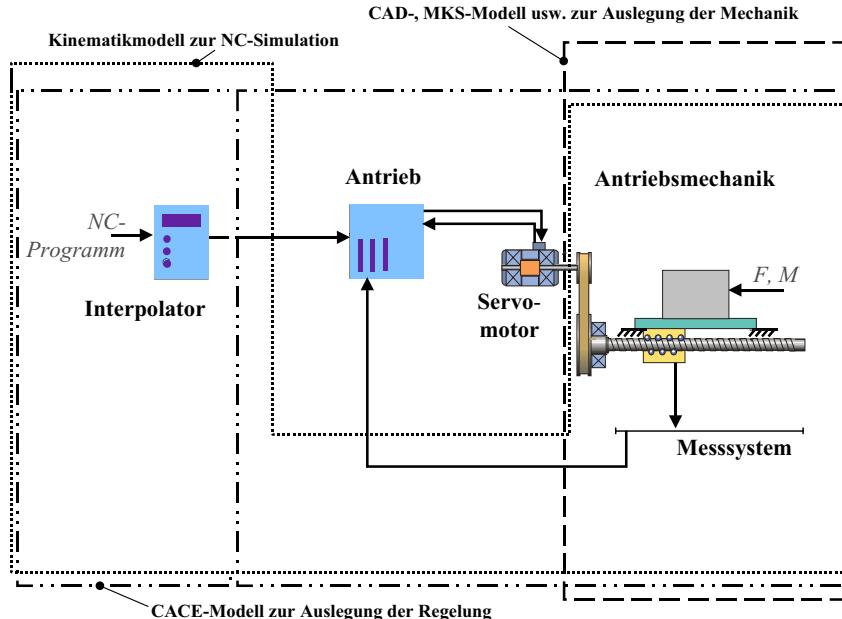


Abbildung 5-7: Mehrfachmodellierung desselben Teilsystems in unterschiedlicher Software

Daraus ergeben sich zwei wesentliche Probleme für den Aufbau mechatronischer Modelle. Da zur Modellbildung mechatronischer Systeme die auf bestimmte Fachbereiche spezialisierten Simulationsprogramme herangezogen werden, weisen die Modelle Unterschiede hinsichtlich des fachbereichspezifisch abbildbaren Detailierungsgrades auf. So kann z. B. mit Hilfe umfangreicher Bibliotheken der CACE-Software der Aufbau der Regelung sehr detailliert beschrieben werden, während sich die Mechanik nur mit Einschränkungen modellieren lässt. Des Weiteren kommt es durch die aufgabenspezifischen Modelle zu Mehrfachmodellierungen desselben Teilsystems in unterschiedlichen Programmen.

Aus der Darstellung der zur Werkzeugmaschinenauslegung eingesetzten Simulationsprogramme wurde deutlich, dass die Simulationsprogramme in der Regel in ihrer Funktionalität disziplinspezifisch ausgerichtet sind. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass auch das Know-how der Berechnungsingenieure traditionell

disziplinspezifisch ausgeprägt ist. Dem steht der Entwicklungsprozess mit der immer mehr an Bedeutung gewinnenden Forderung nach einer mechatronischen Auslegung der Werkzeugmaschinen gegenüber. Diesem Umfeld muss die neue Vorgehensweise Rechnung tragen, so dass auf der einen Seite das Know-how der Berechnungsingenieure weiterhin optimal genutzt und unterstützt wird und auf der anderen Seite der Forderung nach einer mechatronischen Auslegung nachgekommen wird. Aus diesen Überlegungen werden die Forderungen an die neue Methode zum Aufbau mechatronischer Modelle abgeleitet.

5.2 Anforderungen an ein geändertes Vorgehen

Zielsetzung eines effizienten Entwicklungsprozesses ist es, die Gesamtwirtschaftlichkeit der Produktentwicklung zu erhöhen. Daher muss auch der Simulationseinsatz unter Berücksichtigung der hierfür erforderlichen Ressourcen kritisch betrachtet werden. Der Simulationseinsatz trägt dann zur Effektivitätssteigerung bei, wenn durch den Simulationseinsatz die Qualität der Produkte verbessert und die hierfür erforderliche Entwicklungszeit konstant gehalten oder gar verkürzt werden kann. Damit lassen sich folgende Anforderungen an die neue Methode zur simulationsbasierten, mechatronischen Auslegung von Werkzeugmaschinen stellen:

- Die Methodik muss eine durchgängige Modellbildung der Teilsysteme aus den Bereichen Mechanik, Elektronik und Informationstechnik beschreiben, so dass sich die fachabteilungsspezifischen Modelle kombinieren lassen.
- Die Methode soll die Transparenz der Modellstrukturen verbessern und damit die interdisziplinäre Zusammenarbeit fördern.
- Die Methode soll dazu beitragen, dass die für ein Simulationsprogramm erzeugten Daten unverändert in anderen Simulationsprogrammen wiederverwendet werden können.
- Die Methode muss darauf zugeschnitten sein, dass sie das fachbereichsspezifische Know-how der Berechnungsingenieure unterstützt.
- Für standardisierte Komponenten soll die Simulationsumgebung vordefinierte Modelle zur Verfügung stellen.

5.3 Konzept der neuen Modellbildungsmethodik

Die neue Vorgehensweise zum Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle sieht den in Abbildung 5-8 dargestellten und in den beiden folgenden Kapiteln beschriebenen

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle

Ablauf vor. Um den Anforderungen gerecht werden zu können, wird eine hohe Modularität bei der Modellbildung angestrebt.

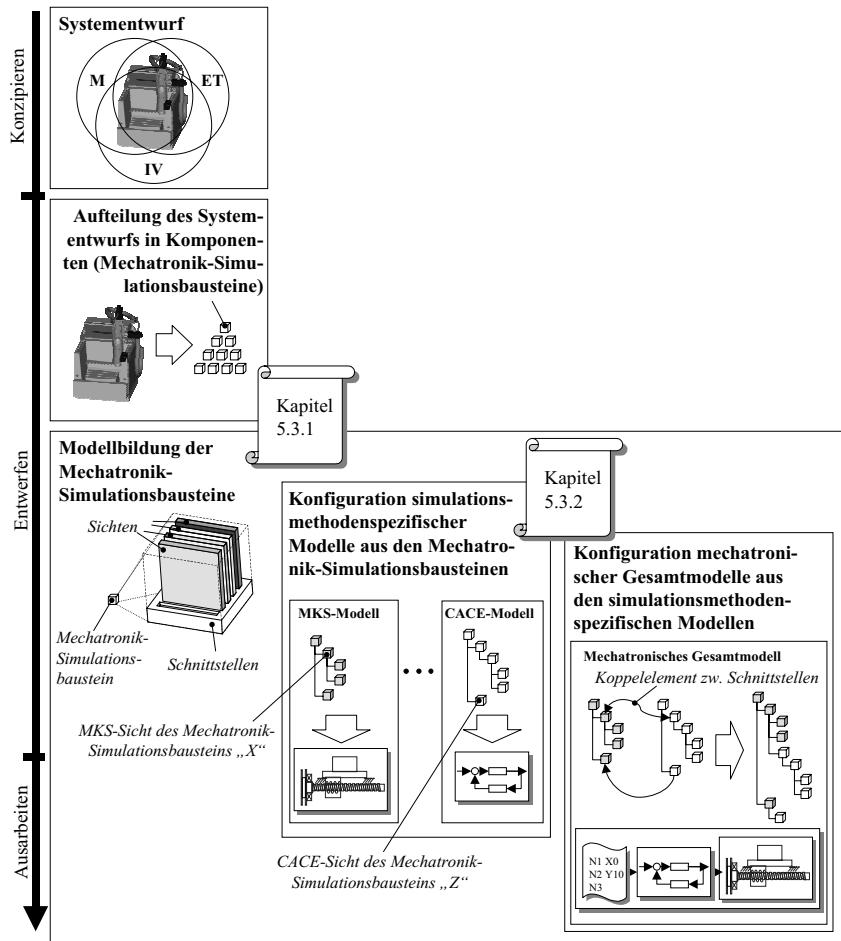


Abbildung 5-8: Neue Vorgehensweise beim Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle für die Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen

5.3.1 Aufbau der Mechatronik-Simulationsbausteine

Auf Grund der angestrebten Modularität wird der Systementwurf in einem ersten Schritt in einzelne Komponenten zerlegt (Abbildung 5-8). Dadurch wird erreicht, dass alle Daten in Bezug auf dieselbe Systemgrenze generiert werden. Als Folge daraus müssen zunächst Regeln für die Wahl der Systemgrenze festgelegt werden. Die Wahl der Systemgrenzen für die Aufspaltung des Systementwurfs in Komponenten erfolgt im Hinblick auf die Aufgabenstellung, hier die Unterstützung der Auslegung mehrachsiger, gekoppelter Verfahrerbewegungen. Einfach gestaltet sich die Wahl der Systemgrenze für Zukaufteile. Da diese immer wieder unverändert verbaut werden, bietet es sich an, Zukaufteile als abgeschlossene Systeme zu betrachten. Die zugehörigen Simulationskomponenten müssen einmalig aufgebaut werden und können unverändert bis zu einem Produktwechsel wiederverwendet werden. Komplizierter ist die Wahl der Systemgrenze für Komponenten aus den Bereichen, die der ständigen, konstruktiven Veränderung unterliegen. Dies ist bei den meisten mechanischen Komponenten der Fall. Für die Wahl der Systemgrenze haben sich hier die natürlichen Schnittstellen, wie z. B. Verschraubungen, Lagerungen, Führungssysteme usw. bewährt. Die Systemgrenze ist so zu wählen, dass sie mit Bauteilen oder Baugruppen zusammenfällt, die für sich funktionsfähig sind und eine minimale Anzahl an Schnittstellen zu anderen Bauteilen oder Baugruppen haben. Ergebnis dieser Phase ist eine begrenzte Anzahl an Komponenten mit einer festgelegten Systemgrenze. Alle Daten, die im Rahmen der Modellbildung des physikalischen Verhaltens dieser Komponente als Eingangsgrößen für die unterschiedlichen Simulationsprogramme erzeugt werden, wie z. B. Geometriefile, Masse, Trägheitstensor, besitzen alle dieselbe Systemgrenze.

Weiterhin gilt es zu bedenken, dass unterschiedliche Simulationsmethoden zum Teil die gleichen Daten benötigen, z. B. Geometrie, Masse. Im Hinblick auf die Steigerung der Wiederverwendbarkeit müssen daher für die redundanten Daten, soweit möglich, einheitliche Formate definiert werden. Hierzu müssen die in einem Unternehmen eingesetzten Simulationsmethoden hinsichtlich der erforderlichen Daten analysiert und für redundante Daten ein einheitliches Datenformat festgelegt werden (vgl. Tabelle 5-1). Dies hat einmalig für die in einem Unternehmen eingesetzten Programme zu erfolgen.

Zuletzt müssen Regeln für die durchgängige Modellierung der Schnittstellen zwischen den Komponenten erarbeitet werden. Auf Grund der eingangs vorgeschlagenen Richtlinien für die Wahl der Systemgrenze ergeben sich für einen Betrachtungsbereich, hier die Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens, "Standardkomponenten". Für diese Standardkomponenten können Standardschnittstellen identifiziert werden. Für diese Standardschnittstellen können wiederum Regeln für die durchgängige Modellbildung ausgearbeitet werden.

Durch die Definition einer einheitlichen Systemgrenze, die Vorgabe von Regeln für die Modellierung der Schnittstellen und die Festlegung durchgängiger Datenformate

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle

können parallel und unabhängig voneinander von den Berechnungsingenieuren die Daten erzeugt werden, die sie für die Modellierung der Komponenten in der jeweiligen Simulationssoftware benötigen. Dennoch ist die Konsistenz der Daten sichergestellt.

Alle Daten einer Komponente, die auf diese Weise generiert werden, um das physikalische Verhalten der Komponente und letztendlich eines Systems mit Hilfe der erforderlichen Simulationsmethoden beschreiben zu können, werden zu einem so genannten "Mechatronik-Simulationsbaustein" zusammengefasst (Abbildung 5-9). Die Verwaltung der Vielzahl der Daten erfolgt innerhalb eines Mechatronik-Simulationsbausteins simulationsmethodenspezifisch in Form von "Sichten". Dies erleichtert den Berechnungsingenieuren den Zugang zu den Daten, je nachdem welche Simulationsmethode sie gerade anwenden. Der Mechatronik-Simulationsbaustein ist damit die organisatorische Einheit, die die Generierung der simulationsmethodenspezifischen Daten vereinheitlicht und zur Beschreibung der mechatronischen Simulationsmodelle herangezogen wird. Die Modellbildung der Teilsysteme auf Basis der Mechatronik-Simulationsbausteine wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

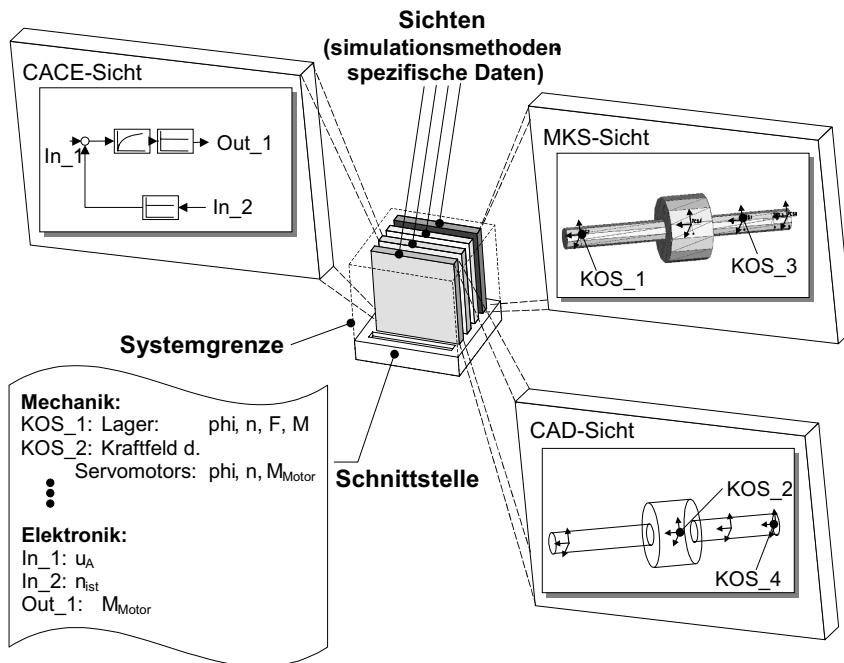


Abbildung 5-9: Aufbau eines Mechatronik-Simulationsbausteins

5.3.2 Konfiguration simulationsmethodenspezifischer und mechatronischer Modelle aus den Mechatronik-Simulationsbausteinen

Die Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine bilden die elementaren Einheiten der simulationsmethodenspezifischen Modellbildung. Unter Ausnutzung des in den Fachabteilungen vorhandenen Know-hows erfolgt gemäß der Aufgabenstellung die simulationsmethodenspezifische Konfiguration der Modelle. "Konfiguration" bezeichnet den Aufbau der Modelltopologie (siehe Kapitel 5.1.1.1f.), d. h. es wird festgelegt, welche Schnittstelle welcher Sicht von welchem Mechatronik-Simulationsbaustein über welches Verbindungselement mit einem anderen Mechatronik-Simulationsbaustein in Beziehung steht (Abbildung 5-10). Die Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine repräsentieren die Körper. Als Hilfsmittel für die Dokumentation der Topologiediagramme eignet sich jede beliebige DTP¹ Software, mit der zweidimensionale Skizzen angefertigt werden können. Ausgehend von diesem Topologiediagramm wird das Modell in der zugehörigen Software implementiert. Die hierfür benötigten Daten kann der Berechnungsingenieur der jeweiligen Sicht des Mechatronik-Simulationsbausteins entnehmen. Auf Grund dieser Vorgehensweise entstehen zunächst modulare, simulationsmethoden- und fachbereichsspezifische Modelle. Somit kann ein Regelkreismodell bei Bedarf auch ohne Kopplung zu einem anderen Modell verwendet werden. Dadurch sind die simulationsmethodenspezifischen Modelle austauschbar und wiederverwendbar.

Die simulationsmethodenspezifischen Modelle können für mechatronische Aufgabenstellungen zu Simulationsmodellverbünden gekoppelt werden. Auch die mechatronischen Gesamtmodelle lassen sich in Form eines Topologiediagramms beschreiben. Hierzu werden die simulationsmethodenspezifischen Topologiediagramme verknüpft. Die Kopplung der simulationsmethodenspezifischen Modelle erfolgt ebenfalls über die standardisierten Schnittstellen der Mechatronik-Simulationsbausteine. Benötigt z. B. die Elektrokonstruktion zur Auslegung der Antriebe ein Modell der Antriebsmechanik, so kann das entsprechende Modell der Mechanik an das Modell der Elektrokonstruktion angekoppelt werden und muss nicht mehr, wie bisher, auch von der Elektrokonstruktion modelliert werden.

Kennzeichen der neuen Vorgehensweise ist die hohe Modularität der Modellbildung. Die Modularität stützt sich auf die Mechatronik-Simulationsbausteine und die simulationsmethodenspezifischen Modelle. Vorteil der neuen Vorgehensweise der Modellbildung ist, dass die Fachabteilungen nur die Modelle aufbauen, die in ihrer Kernkompetenz liegen. Werden für eine Aufgabenstellung Modelle aus einer anderen Abteilung benötigt, wie dies bei der mechatronischen Auslegung der Fall ist, werden die Modelle der Fachabteilungen gekoppelt. Wie der Abbildung 5-8 zu entnehmen ist, erfolgt der Aufbau der verschiedenen Sichten — die Generierung der simulations-

¹ Desktop Publishing

5 Konzeption einer neuen Methode für die Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle

methodenspezifischen Daten — eines Mechatronik-Simulationsbausteins entsprechend der Reihenfolge, wie die Simulationsmethoden zur Anwendung kommen. Die Reihenfolge kann je nach Aufgabenstellung beliebig variieren. Durch die Mechatronik-Simulationsbausteine wird sichergestellt, dass einmal generierte Daten in allen nachfolgenden Modellen wiederverwendet werden können. Und nicht zuletzt können einmal erstellte Mechatronik-Simulationsbausteine oder Modelle in zukünftigen Entwicklungen wiederverwendet werden.

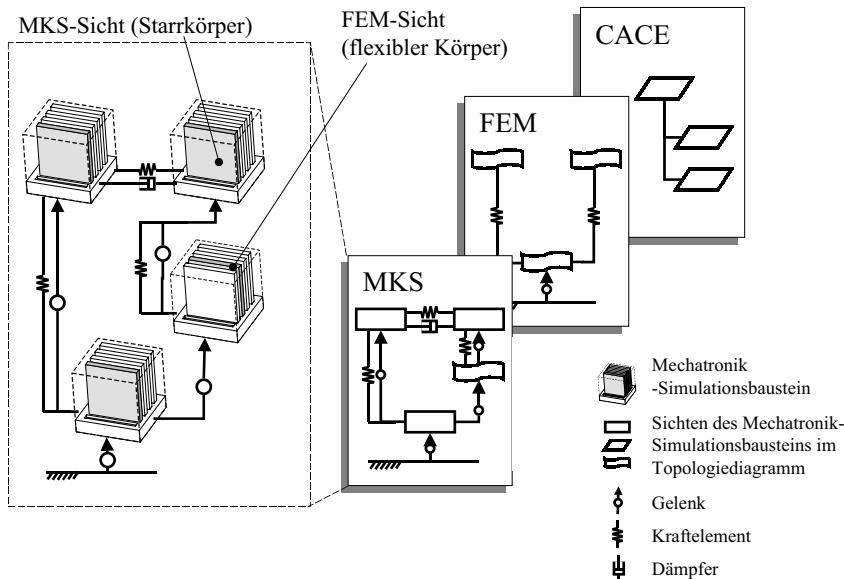


Abbildung 5-10: Konfiguration unterschiedlicher simulationsmethodenspezifischer Modelle aus den Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine

Wie eben erwähnt, erfolgt der Aufbau der verschiedenen Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine parallel zur Spezifikation der simulationsmethodenspezifischen Modelltopologie. Dabei gilt es zu bedenken, dass am Aufbau der verschiedenen Sichten und damit an der Generierung der zugehörigen Daten verschiedene Personen beteiligt sind. Die Konsistenz der Daten ist zwar durch die Vorgehensweise sichergestellt, nicht aber die Vermeidung der Erzeugung redundanter Daten. Um die Effektivität der Methode zu verbessern, muss folglich ein Werkzeug entwickelt werden, das den Aufbau der Mechatronik-Simulationsbausteine unterstützt und dabei die Erzeugung redundanter Daten verhindert. Zudem soll es die abteilungsübergreifende und mechatronikgerechte Verwaltung und Dokumentation der simulationsmethodenspezifischen und mechatronischen Modelle unterstützen. Die Konzeption dieses Werkzeugs ist Inhalt des nun folgenden Kapitels 6.

6 Konzeption eines Werkzeugs zur Unterstützung der Methode

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, ein Werkzeug zu entwickeln, das die neue Methode zum Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle auf Basis von Mechatronik-Simulationsbausteinen unterstützt. Dieses Werkzeug wird im Folgenden **Mechatronik-Simulation Management Systems (M²S²)** genannt.

6.1 Anforderungen an das Mechatronik-Simulation Management System

Vor dieser Zielsetzung werden folgende Anforderungen an das M²S² gestellt:

- Simulationsmethodenbezogene Bereitstellung aller verfügbaren Informationen.
- Hilfestellung in Bezug auf die durchgängige Modellbildung der standardisierten Schnittstellen.
- Vorgabe der erforderlichen Datenformate.
- Unterstützung der simulationsmethodenspezifischen und simulationsmethodenübergreifenden Modellbildung.
- Übersichtliche Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Modellen.
- Dokumentation der Modellbildung und der Simulationsergebnisse.

Neben diesen primären Anforderungen werden eine Reihe von Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit des Mechatronik-Simulation Management Systems gestellt. Hierzu zählen eine intuitive Benutzeroberfläche mit mechatronikgerechten Navigationsmöglichkeiten, die Möglichkeit zur Dokumentation der anfallenden Unterlagen, die Bereitstellung umfangreicher Anzeige-Funktionalitäten für Dateiformate, ein einfacher Datenzugriff sowie Suchfunktionen.

Einem Großteil dieser Anforderungen könnte prinzipiell durch den Einsatz eines EDM/PDM-Systems Rechnung getragen werden. Wie sich später (s. Kapitel 7.2) zeigen wird, sind die meisten heute verfügbaren EDM/PDM-Systeme zunächst völlig unternehmens- und produktneutral aufgebaut. Die Anpassung dieser Systeme an die unternehmensspezifischen Abläufe ist daher meist mit sehr viel Aufwand und infolgedessen mit hohen Kosten verbunden. Die hohen Kosten stellen gerade für die kleinen und mittelständischen Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus eine besondere finanzielle Herausforderung dar. Daher wurde das M²S² entwickelt, das speziell auf die Unterstützung des Aufbaus mechatronischer Simulationsmodelle zur Auslegung NC-gesteuerter Werkzeugmaschinenverfahrbewegungen konzipiert ist.

Dadurch entfallen die Kosten für die Analyse der spezifischen Abläufe und die Anpassung eines kommerziellen EDM/PDM-Systems, wodurch der finanzielle Aufwand für ein Werkzeug zur Unterstützung der Methode deutlich reduziert wird.

6.2 Konzeption des Mechatronik-Simulation Management Systems

Wie den Anforderungen zu entnehmen ist, muss das MS^2 einen sehr großen Aufgabenbereich unterstützen. Dieser erstreckt sich von der Unterstützung des Aufbaus der Mechatronik-Simulationsbausteine über die Modellbildung der simulationsmethodenspezifischen Modelle bis hin zur Archivierung und Dokumentation der zugehörigen Simulationsergebnisse. Das Bestreben, diese zum Teil sehr unterschiedlichen Aufgabenstellungen optimal zu unterstützen, führte zu dem Schluss, das MS^2 aus zwei Modulen aufzubauen: Einem *Bibliotheksmodul*, das den korrekten Aufbau der Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine sicherstellt und diese verwaltet und das entsprechende Pendant für die Simulationsmodelle, das *Simulationsprojektmodul*. Die Verwaltung der physikalischen Daten erfolgt in einer externen Datenbasis (Abbildung 6-1).

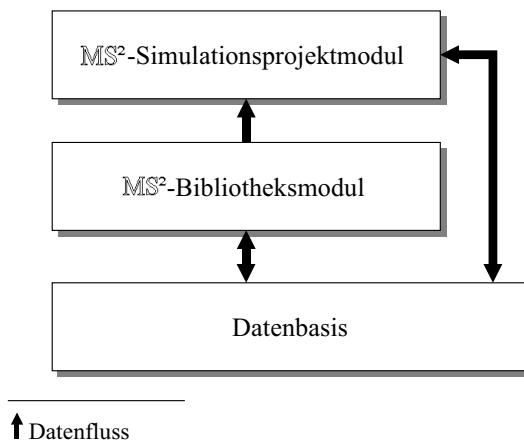


Abbildung 6-1: Prinzipieller Aufbau des Mechatronik-Simulation Management Systems

Das Bibliotheksmodul

Zunächst soll das Bibliotheksmodul genauer betrachtet werden. Die Produktentwicklung am virtuellen Prototypen hat zur Folge, dass eine große Anzahl von Daten mit spezialisierten CAE-Werkzeugen oder mit Office-Anwendungen generiert wird. Die effektive Produktentwicklung ist dabei nur möglich, wenn die anfallenden Modelle, Zeichnungen, Stücklisten, Schaltpläne, Berechnungsprotokolle, Arbeitspläne, NC-Programme usw. nicht wie häufig praktiziert auf den Festplatten der einzelnen Rechner oder, bei zentraler Datenhaltung, in einem weit verzweigten, undurchsichtigen Filesystem des unternehmensweiten Netzwerks verschwinden, sondern stattdessen für alle transparent verwaltet werden.

Als Hilfsmittel hierfür wurden die Mechatronik-Simulationsbausteine eingeführt. Dabei gilt es zu bedenken, dass der Datenbestand eines Mechatronik-Simulationsbausteins während der virtuellen Produktentwicklung fortlaufend um prozessbezogene, technologische und administrative Informationen erweitert wird. Die in Kapitel 5.1.1.5 beschriebenen, unterschiedlichen Sichten und zugehörigen Modelle entstehen folglich im Laufe des Lebenszyklus eines Mechatronik-Simulationsbausteins und stehen nicht von Beginn an zur Verfügung. Dieser Prozess muss durch das **MS²**-Bibliotheksmodul unterstützt werden.

Das Simulationsprojektmodul

Das Simulationsprojektmodul des **MS²** dient der Dokumentation und der Verwaltung der Simulationsprojekte. Wie in Kapitel 5.1.1.5 beschrieben, besteht eine wesentliche Aufgabe der Modellbildung, bevor mit der Implementierung des Modells in einem Simulationsprogramm begonnen werden kann, in der Beschreibung der realen physikalischen Zusammenhänge durch ein Ersatzmodell. Als Notation zur Beschreibung des Ersatzmodells wurde das Topologiediagramm gewählt. Betrachtet man bei Kinematiktopologiediagrammen die Verbindungen der Körper durch Gelenke und auch bei den MKS-Topologiediagrammen nur die Verbindungen der Körper durch Gelenke, so können die Topologiediagramme in Form einer Baumstruktur beschrieben werden. Durch geeignete Strukturierung der Modelle gilt dies auch, wie im Realisierungskapitel noch gezeigt wird, für die übrigen Modelle. Diese vereinfachte Beschreibung der Topologiediagramme gibt den Berechnungsingenieuren einen schnellen Überblick über die Modellstruktur und wird daher für die Dokumentation der Modelle im Simulationsprojektmodul genutzt.

An den Aufbau der Topologiediagramme und die darauf aufbauende Implementierung der Modelle in den zugehörigen Simulationsprogrammen schließt sich die Durchführung der Simulationsexperimente an. Die klassische Vorgehensweise bei der Durchführung eines Simulationsprojektes ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Wie dem Ablaufdiagramm zu entnehmen ist, ist die Durchführung eines Simulationsprojekts ein zyklischer Vorgang mit meist mehreren Optimierungsschleifen. Kennzeichen des

simulationsgestützten Optimierungsprozesses ist somit, dass man sich in kleinen Schritten dem Ziel der Simulationsaufgabe annähert (Reinhart 1999).

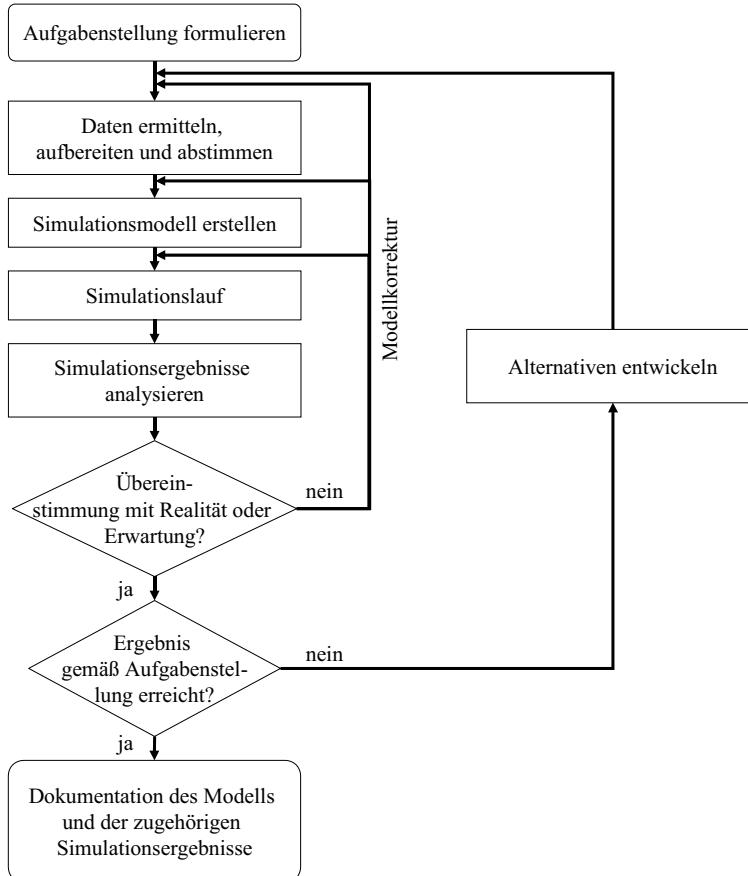


Abbildung 6-2: Der simulationsgestützte, iterative Optimierungsprozess (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3633C)

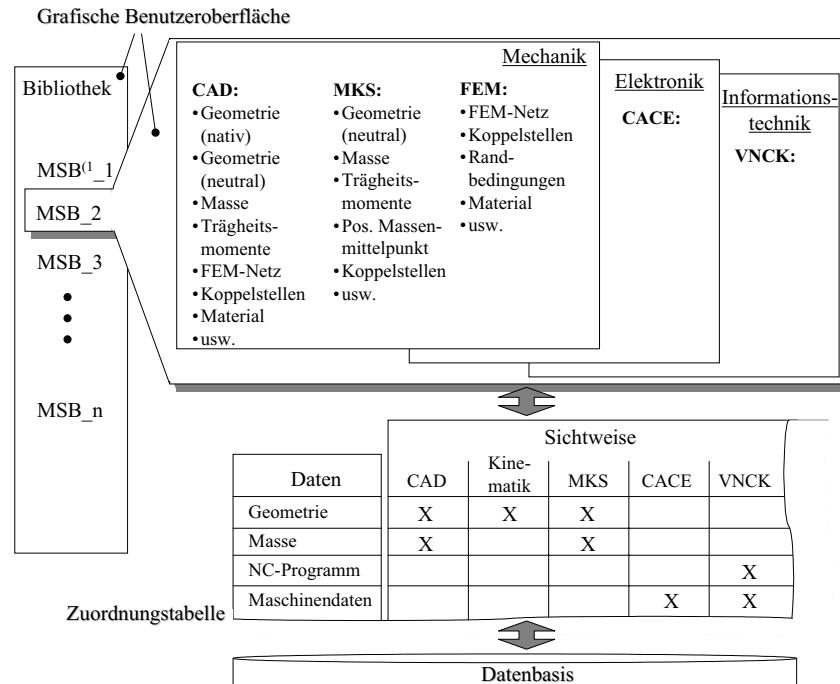
Vonseiten der Datenhaltung betrachtet bedeutet dies, dass von Simulationslauf zu Simulationslauf in der Regeln nur ein Parameter oder einige wenige Parameter verändert werden. Folglich ändert sich der dem Berechnungslauf zu Grunde liegende Datenbestand nur geringfügig. Um jedoch zu einem späteren Zeitpunkt auf einen zurückliegenden Entwicklungsschritt zurückgreifen zu können, wird das komplette

Simulationsmodell von Modellkorrekturschleife zu Modellkorrekturschleife und von Alternative zu Alternative in der Regel unkommentiert zwischengespeichert. Da mechatronische Gesamtmodelle, insbesondere deren Ergebnisfiles, häufig sehr viel Speicherplatz benötigen, steigt der belegte Speicherplatz schnell an. Die Dokumentation des Simulationsmodells und der zugehörigen Ergebnisse erfolgt meist erst mit dem erfolgreichen Abschluss eines Simulationsprojekts.

Diese Vorgehensweise gestaltet das Nachvollziehen eines Simulationsprojekts oder das Zurückspringen auf einen früheren Datenbestand, insbesondere für einen Außenstehenden, äußerst schwierig. Aufgabe des Simulationsprojektmoduls des MS^2 ist es, Transparenz in den Modellaufbau und die Durchführung der Simulationsexperimente zu bringen und auch hier die Entstehung redundanter Daten zu vermeiden. In den folgenden beiden Kapiteln wird der hierauf zugeschnittene Aufbau der beiden Module des MS^2 vorgestellt. Des Weiteren wird beschrieben, wie die Module in den Modellbildungsprozess integriert sind.

6.3 Aufbau und Funktionsweise des Bibliotheksmoduls

Das MS^2 -Bibliotheksmodul setzt sich aus der Zuordnungstabelle und der grafischen Benutzeroberfläche zusammen (Abbildung 6-3). Wie in der Abbildung dargestellt, erfolgt der Zugang zu den Daten eines Mechatronik-Simulationsbausteins über eine Bibliothek, in der die verfügbaren Mechatronik-Simulationsbausteine aufgelistet sind. Innerhalb eines Mechatronik-Simulationsbausteins erfolgt die Zuordnung der Daten zu den Simulationsmethoden, so dass der Berechnungsingenieur auf einen Blick die Information zur Verfügung gestellt bekommt, welche der benötigten Daten bereits existieren. Die Simulationswerkzeuge ihrerseits sind nochmals den mechatronischen Disziplinen — Mechanik, Elektronik, Informationstechnik — zugeordnet, zu deren Auslegung sie vornehmlich eingesetzt werden. Wie in Abbildung 6-3 dargestellt, werden Daten, die für unterschiedliche Sichten identisch sind, in der grafischen Benutzeroberfläche zwar in jeder Sicht ausgewiesen. Das physikalische File ist aber nur einmal in der Datenbasis vorhanden. Durch die Trennung von Applikation und Datenbasis kann das MS^2 an beliebige Datenbasen angebunden werden. Die Zuordnung der Daten zu den Sichten erfolgt über eine Zuordnungstabelle. Diese wird durch Analyse der eingesetzten Simulationsmethoden hinsichtlich der benötigten Daten gewonnen (vgl. Tabelle 5-1). Lässt sich beispielsweise der FEM-Berechnungsingenieur die Masse einer Komponente berechnen und stellt diese in seine FEM-Sicht des Mechatronik-Simulationsbausteins ein, so bekommt der MKS-Berechnungsingenieur die Masse automatisch in der MKS-Sicht dargestellt, da die Masse auch für ihn von Bedeutung ist. Zur Unterstützung der durchgängigen Modellbildung der Schnittstellen gibt das MS^2 -Bibliotheksmodul in Form von Skizzen Hilfestellung zur Modellbildung der Schnittstellen und stellt Standardformulare zur Dokumentation der Schnittstellen zur Verfügung.



⁽¹⁾ MSB = Mechatronik-Simulationsbaustein

Abbildung 6-3: Beispielhafte Verknüpfung der Datenbasis mit dem MS^2 -Bibliotheksmodul

Durch die Einführung des MS^2 ergibt sich für die Berechnungsingenieure folgende Vorgehensweise für die Erzeugung der für die Modellbildung benötigten Daten (Abbildung 6-4). An den Aufbau der Modelltopologie aus den Mechatronik-Simulationsbausteinen schließt sich die Implementierung der Topologie in der zugehörigen Software an. Die für die Modellierung der Komponente in der Software erforderlichen Daten bezieht der Berechnungsingenieur aus der grafischen Benutzeroberfläche des Bibliotheksmoduls. Durch Blick in die grafische Benutzeroberfläche prüft er zunächst, ob die erforderlichen Daten bereits zur Verfügung stehen. Sollte dies der Fall sein, stellt das MS^2 die Funktionalität bereit, dass, je nachdem wie es die Software erfordert, der Datensatz als Datei in das Dateisystem der Simulationssoftware oder der Inhalt des Datensatzes in den Quellcode des Modells übernommen werden kann. Sind benötigte Daten nicht abrufbar, erzeugt sich der Berechnungsingenieur die Daten in der hierfür erforderlichen Software und stellt diese in seiner Sicht in das Bibliotheksmodul ein. So findet einerseits der Berechnungsingenieur die zu einer Komponente gehörenden Daten zu einem späteren Zeitpunkt schnell wieder, andererseits sind die Daten auch für alle anderen Berechnungsingenieure simulationsmethodenbezogen verfügbar.

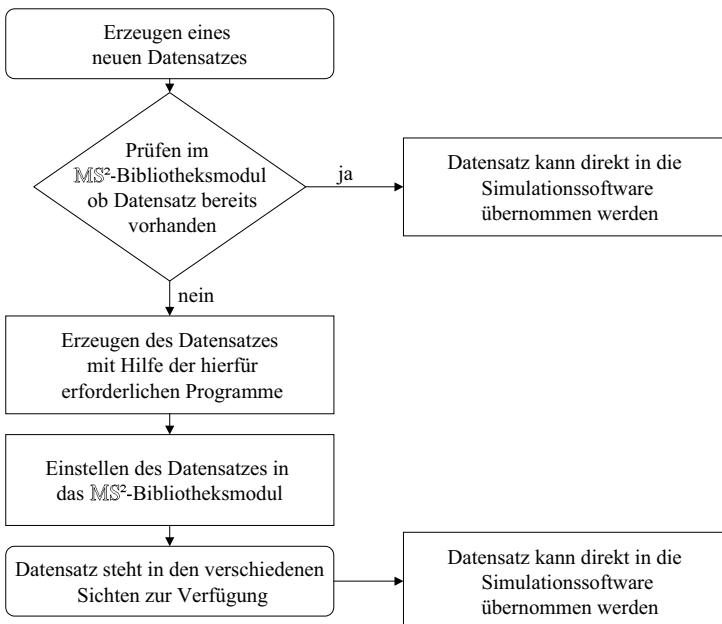


Abbildung 6-4: Vorgehensweise bei der Erzeugung eines neuen Datensatzes unter Verwendung des MS^2 -Bibliotheksmoduls

6.4 Aufbau und Funktionsweise des Simulationsprojektmoduls

Die Dokumentation der Modelltopologie erfolgt im Simulationsprojektmodul. Grundlage der Beschreibung bilden die Mechatronik-Simulationsbausteine. Das MS^2 stellt eine Funktionalität zur Verfügung, mit der die Mechatronik-Simulationsbausteine aus dem Bibliotheksmodul in das Simulationsprojektmodul übernommen werden können. Aufbauend auf den Sichten kann nun im Simulationsprojektmodul die Topologie der simulationsmethodenspezifischen Modelle in Form einer Baumstruktur beschrieben werden (Abbildung 6-5).

Die mechatronischen Modelle entstehen durch Verknüpfung der simulationsmethodenspezifischen Modelle. Auf Grund der dominierenden Rolle der Mechanik im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen (vgl. Kapitel 5.1) dient die Topologie der Mechanik als Grundstruktur zur Beschreibung des mechatronischen Gesamtsystems. Die aus anderen Fachbereichen stammenden Teilmodelle werden in die

6 Konzeption eines Werkzeugs zur Unterstützung der Methode

Baumstruktur der Mechanik integriert, indem Komponenten, die über eine Schnittstelle untereinander in Beziehung stehen, aneinander angehängt werden.

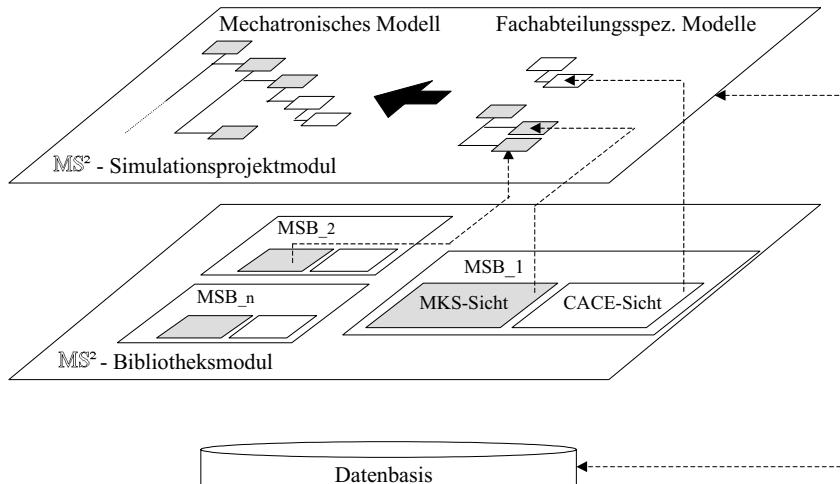


Abbildung 6-5: Zusammenspiel zwischen Simulationsprojektmodul und Bibliotheksmodul

Die mit dieser speziellen Modellkonfiguration erzielten Simulationsergebnisse werden mit dem Modell abgespeichert. Das Simulationsprojektmodul dient damit der Zusammenführung von Simulationsrohdaten (Simulationsmodelle) und Simulationsergebnissen.

7 Konzeption der IT-Infrastruktur

An der Entwicklung von Werkzeugmaschinen und damit insbesondere an der Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens sind zahlreiche Personen aus verschiedenen Abteilungen beteiligt. Wie oben geschildert wurde, ist deren Arbeit dadurch gekennzeichnet, dass sie in den verschiedenen Abteilungen mit unterschiedlichen Programmen arbeiten. Jedes Programm hat eine eigene Datenstruktur und eigene Datenformate. Die Programme zeichnen sich folglich durch eine hohe Heterogenität aus. Durch die immer mehr an Bedeutung gewinnende Zusammenarbeit nimmt zudem die Anzahl der Schnittstellen zwischen den Programmen stetig zu. Dies erfordert eine auf die Methode zugeschnittene IT-Infrastruktur. Aufgaben, die es hierbei zu lösen gilt, sind die softwaretechnische Einbindung der Werkzeuge in die Simulationsumgebung, die Verwaltung der anfallenden Daten und die Organisation des gemeinsamen Datenzugriffs. Die Erarbeitung der hierauf abgestimmten IT-Infrastruktur ist Inhalt des vorliegenden Kapitels.

7.1 Die Architektur der Simulationsumgebung

Die Simulationsumgebung setzt sich systemtechnisch aus den vier Ebenen Datenbasis, PDM-System, Kommunikationsschicht und Applikationsebene zusammen (Abbildung 7-1). Aufgabe der Datenbasis ist die Sicherung aller Daten. Zur strukturierten Verwaltung der Daten wurde ein PDM-System auf die Datenbasis aufgesetzt. Dies bietet weiterhin den Vorteil, dass die Standardfunktionalitäten kommerzieller PDM-Systeme wie Versionsmanagement oder Workflowmanagement genutzt werden können. Da die Datenbasis und das PDM-System softwaretechnisch sehr eng miteinander verbunden sind, werden Datenbasis und PDM-System im Folgenden gemeinsam betrachtet und als Datenebene bezeichnet. Wesentlicher Bestandteil der neuen Vorgehensweise bei der Modellbildung sind die Mechatronik-Simulationsbausteine. Die Mechatronik-Simulationsbausteine sind auf der einen Seite die Grundelemente der Modellbildung. Auf der anderen Seite dienen sie der mechatronikgerechten Strukturierung der Daten. Aufgabe des oben vorgestellten Mechatronik-Simulation Management Systems ist es, dies durch eine Software zu unterstützen. Dadurch wird das Mechatronik-Simulation Management System zum Bindeglied zwischen den Simulationsprogrammen und der Datenbasis. Die Trennung von Simulationssoftware und Datenbasis garantiert eine hohe Datensicherheit und ermöglicht den parallelen Zugang mehrerer Nutzer auf die Daten. Der Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Programmen wird über die Kommunikationschicht ermöglicht. Die Applikationsebene, bestehend aus Mechatronik-Simulation Management System und Modellen, wurde bereits vorgestellt. Der Fokus der folgenden Ausführungen liegt daher auf der Datenebene und der Kommunikationsebene.

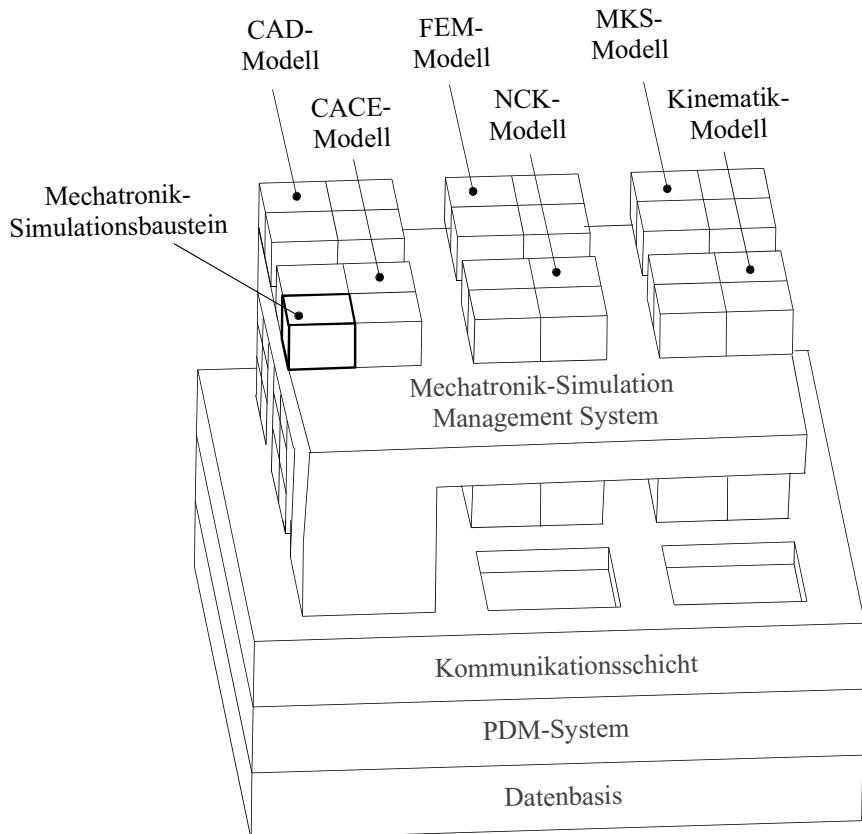


Abbildung 7-1: Architektur der Simulationsumgebung

7.2 Die Datenebene

Aufgabe der Datenebene ist die Datenverwaltung. Die Informationen, die es im Hinblick auf die Methode zu verwalten gibt, sind alle Daten, die für den Aufbau der Modelle benötigt werden, die Simulationsmodelle selbst und jegliche Daten zur Dokumentation. Denn die Methode trägt unter anderem dadurch zur Effektivitätssteigerung im Bereich der Produktentwicklung bei und wird infolgedessen für ein Unternehmen zu einem hochwertigen Produktionsfaktor, dass die im firmenweiten Netzwerk existierenden Informationen allen am Produktentstehungsprozess beteiligten

Personen „auf Knopfdruck“ für deren aufgabenbezogene Nutzung zur Verfügung stehen (Eversheim 1998, S. 82f.).

Wie aus der Darstellung des Bibliotheksmoduls und des Simulationsprojektmoduls ersichtlich wurde, dient das MS² der mechatronikgerechten Strukturierung der für die Simulation mechatronischer Systeme benötigten und später im Rahmen der Simulation anfallenden Daten. Die Verwaltung und Ablage der Daten in einer Datenbasis ist dabei nicht Aufgabe des MS². Hierfür können Standardfunktionalitäten eines kommerziellen PDM-Systems genutzt werden. Vor dieser Zielsetzung werden im Folgenden der Aufbau und die Funktionsweise kommerzieller PDM-Systeme betrachtet.

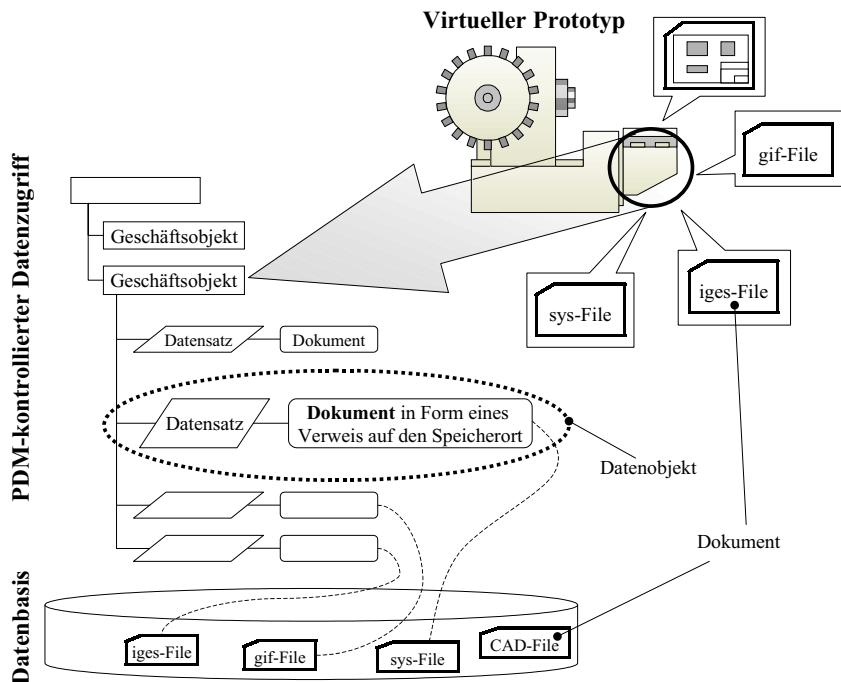


Abbildung 7-2: Prinzip des PDM-basierten Datenmanagements

Die Verwaltung von Produktinformationen und anderen Geschäftsdaten ist die Kernaufgabe eines PDM-Systems. Die Verwaltung der Produktinformationen erfolgt im PDM-System durch die Beschreibung des Produkts in Form einer Produktstruktur (Abbildung 7-2). PDM-Systeme sind in der Regel objektorientierte IT-Systeme. Auf Grundlage dessen werden alle Dokumente, die im Rahmen des Entwicklungsprozesses

generiert werden, seien es Simulationsmodelle, CAD-Files oder Maschinendaten, in Form von Objekten verwaltet. Die Strukturierung der Dokumente erfolgt durch das Geschäftsobjekt und das Datenobjekt. Das Geschäftsobjekt ist das hierarchisch höchste Objekt zur Verwaltung der Produktdaten, vergleichbar einem Ordner, in dem alle Dokumente, die ein Bauteil/eine Baugruppe beschreiben, abgelegt werden. Innerhalb des Geschäftsobjekts werden die Dokumente als Datenobjekte verwaltet. Das Datenobjekt setzt sich aus dem eigentlichen Dokument (Simulationsmodell, CAD-File, Maschinendaten usw.) und einem Datensatz zusammen. Der Datensatz erweitert das Dokument um Zusatzinformationen, so genannte Metadaten, die das Dokument beschreiben. Das Datenobjekt enthält dabei nicht das physikalische Dokument (die auf der Festplatte abgespeicherte Datei), sondern nur einen Verweis auf den Speicherort des Dokuments. Mit Hilfe der Geschäfts- und Datenobjekte können beliebige Produktstrukturen abgebildet werden.

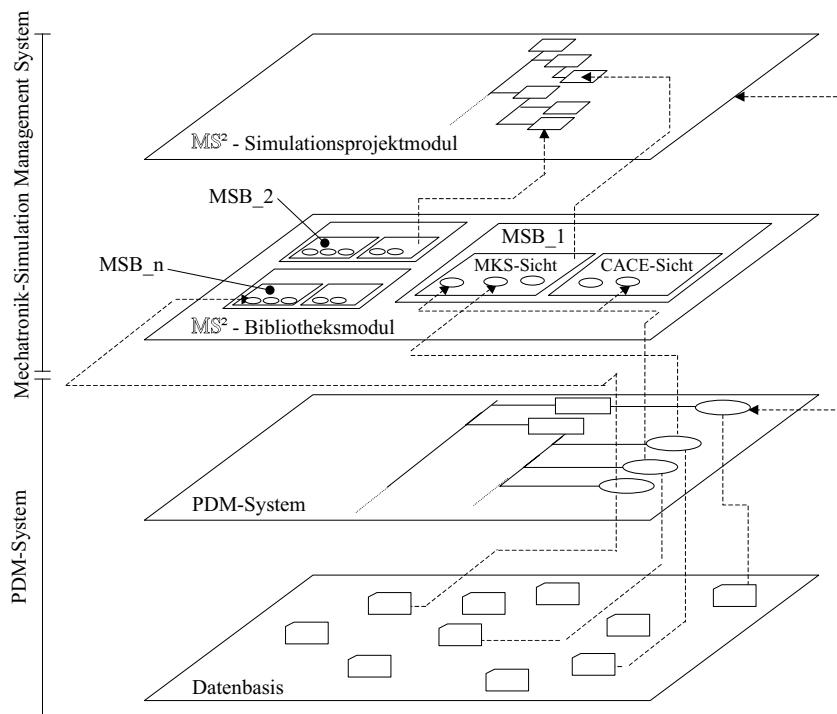


Abbildung 7-3: Zusammenspiel von Mechatronik-Simulation Management System und Datenebene

Zu den wichtigsten Metadaten der Geschäfts- und Datenobjekte gehören eine Identifikationsnummer, ein Änderungsindex (Version und Revision) und ein Bezeichner für den Bearbeitungsstand. Die Identifikationsnummer ist eine eindeutige Nummer. Der Änderungsindex kennzeichnet den Bearbeitungsfortschritt; er wird bei jeder Änderung des Objekts um eins erhöht. Der Bezeichner für den Bearbeitungsstand kennzeichnet den Status bis zur Freigabe eines Objekts (z. B. in Arbeit, in Prüfung, freigegeben). Um ein Höchstmaß an Datensicherheit gewährleisten zu können, werden Geschäftsobjekte und Datenobjekte und deren Metadaten getrennt von den tatsächlichen physikalischen Dokumenten verwaltet. Geschäftsobjekte und Datenobjekte sind in einer vom PDM-System kontrollierten Datenbank organisiert. Die physikalischen Dokumente werden in der Datenbasis, der so genannten Vault-Location, auf den Festplatten des unternehmensweiten Rechnernetzwerks abgelegt.

Die vorgestellte Funktionalität eines PDM-Systems eignet sich, wie im Folgenden gezeigt wird, in idealer Weise zur Verwaltung der anfallenden Daten. Die Adaption des PDM-Systems an das MS^2 sowie die Anbindung von Bibliotheksmodul und Simulationsprojektmodul an die Datenebene ist in Abbildung 7-3 dargestellt. Die Geschäftsobjekte werden zur Verwaltung der Mechatronik-Simulationsbausteine genutzt. Die einen Mechatronik-Simulationsbaustein beschreibenden Daten (CAD-Geometrie, FEM-Netz, Masseinformationen, Maschinendaten, NC-Programme usw.) entsprechen den Datenobjekten. Wie bereits oben erläutert, übernimmt das Bibliotheksmodul die simulationsmethodenspezifische Aufbereitung der Daten für den jeweiligen Mechatronik-Simulationsbaustein. Das Bibliotheksmodul ist daher, wie in Abbildung 7-3 abgebildet, direkt an das PDM-System angebunden. Weiterhin ist die im Rahmen der sichtenspezifischen Aufbereitung der vorhandenen Daten mehrfache Darstellung desselben Datensatzes in unterschiedlichen Sichten eines Mechatronik-Simulationsbausteins kenntlich gemacht. Das Simulationsprojektmodul dient der Dokumentation der aus den Mechatronik-Simulationsbausteinen aufgebauten Modellstrukturen. Daher setzt das Simulationsprojektmodul auf das Bibliotheksmodul auf. Die im MS^2 -Simulationsprojektmodul generierten Modellstrukturen und die zugehörigen Simulationsergebnisse werden vom Simulationsprojektmodul in das PDM-System eingestellt. Die Sicherung der physikalischen Daten erfolgt in der Datenbasis des PDM-Systems.

Zusammenfassend stellt sich die Datenebene folgendermaßen dar. Auf unterster Ebene, der Datenbasis, wird die Gesamtheit der physikalischen Dokumente abgelegt. Eine wesentliche Aufgabe des darüber liegenden PDM-Systems ist die Strukturierung der Daten unter Anwendung der PDM-Funktionalitäten wie Versions- und Statusverwaltung. Da die Anpassung kommerzieller PDM-Systeme an die unternehmensspezifischen Besonderheiten, wie hier die mechatronische Modellbildung, meist äußerst schwierig ist, wurde auf das PDM-System das MS^2 aufgesetzt.

7.3 Die Kommunikationsschicht

Wie einleitend ausführlich diskutiert wurde, besteht das charakteristische Merkmal eines mechatronischen Systems darin, dass Komponenten der verschiedensten Disziplinen, zumindest aber der Mechanik, der Elektronik und der Informationstechnik, zusammenwirken, um eine Funktionalität hervorbringen zu können. Daher ist es unumgänglich, aufgabenspezifisch Verbünde aus geeigneten Simulationswerkzeugen aufzubauen. Voraussetzung hierfür ist, dass die CAE-Werkzeuge geeignete Schnittstellen zur Verfügung stellen. Die hierfür benötigten Schnittstellen lassen sich hinsichtlich ihrer Funktion in zwei Gruppen einteilen: Auf der einen Seite gibt es Schnittstellen, die dazu dienen, zur Berechnungslaufzeit Daten mit anderen Programmen auszutauschen. Auf der anderen Seite müssen die Programme über Schnittstellen verfügen, die ihnen lesenden und schreibenden Zugriff auf eine Datenbasis ermöglichen. Entsprechend unterschiedlich sind die Anforderungen an die Schnittstellen. Die "Laufzeit-Schnittstelle" ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Zur Berechnungslaufzeit müssen große Datenmengen schnell übertragen werden können.
- Für spezielle Berechnungsjobs werden große Rechenkapazitäten (Arbeitsspeicher, CPU-Leistung) benötigt, so dass die Verteilung eines Jobs auf mehrere Rechner möglich sein soll.
- Die Berechnung der Modelle wird fast ausschließlich innerhalb einer Abteilung in einem Unternehmen durchgeführt. Daher kann die Rechnerplattform frei gewählt werden.

Im Gegensatz dazu steht bei der zweiten Gruppe die Datenverwaltung im Vordergrund. Über diese Schnittstelle müssen somit während der Produktentwicklung benötigte Daten aus den unterschiedlichsten Datenbasen abgefragt werden können. Umgekehrt werden die generierten Modelle sowie die zugehörigen Simulationsergebnisse über die Schnittstelle in die Datenbasis eingestellt. Dass die Programme hierfür über geeignete Schnittstellen verfügen, wird vorausgesetzt.

Im Folgenden soll die Laufzeit-Schnittstelle weiter spezifiziert werden. Für die Kommunikation zwischen den Programmen gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- Direkter Datenaustausch zwischen zwei Simulationsprogrammen über eine programmspezifische Schnittstelle.
- Indirekter Datenaustausch über eine neutrale Schicht.

Direkter Datenaustausch über eine programmspezifische Schnittstelle bedeutet, dass der Kommunikationsmechanismus zwischen den Programmen nicht offen gelegt ist. Der Austausch eines simulationsprogrammspezifischen Modells gegen ein alternatives

Modell, aufgebaut in einer anderen Software, ist in der Regel nicht möglich. Im Sinne der Steigerung der Kompatibilität der simulationsmethodenspezifischen Modelle ist es offensichtlich, dass die zweite Variante deutliche Vorteile hat. Der gesamte Datenaustausch erfolgt über eine neutrale Zwischenschicht. Somit lassen sich beliebige Modelle miteinander koppeln, sofern sie die gleichen Ein- und Ausgangsgrößen zur Verfügung stellen. Zudem können die Simulationskomponenten auf einem einzigen Rechner oder auch verteilt auf mehreren Rechnern implementiert sein.

Prinzipiell steht folgende Middleware für die Implementierung der Kommunikation über eine neutrale Zwischenschicht zur Verfügung: das Microsoft-spezifische Protokoll COM/DCOM (Component Object Model bzw. für verteilte Anwendungen Distributed Component Object Model) (*Eddon & Eddon 1998, Rogerson 1997*) sowie das plattformunabhängige Protokoll CORBA (Common Object Request Broker Architecture), das von der Object Management Group (*OMG 2001*) entwickelt wird. COM/DCOM zeichnet sich durch seinen geringen Daten- und Adressierungs-Overhead aus, weshalb es sehr schnell ist. Als primärer Kommunikationsmechanismus zur Berechnungslaufzeit wurde daher COM/DCOM ausgewählt. Die besonderen Vorteile von CORBA sind die Plattformunabhängigkeit und Offenheit, wodurch Schnittstellen äußerst flexibel verbunden werden können. Aus diesem Grund wurde es für die Datenebene ausgewählt.

8 Ausarbeitung der Simulationsumgebung

Nachdem die Methode zum Aufbau mechatronischer Modelle sowie die zugehörige IT-Infrastruktur konzeptionell vorgestellt wurden, soll die Simulationsumgebung speziell für die Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen im Folgenden detailliert ausgearbeitet werden.

8.1 Aufbau mechatronischer Modelle zur Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen

Die ständig steigenden Anforderungen des Marktes hinsichtlich höherer Produktivität und Genauigkeit der Werkzeugmaschinen haben zu einer zunehmenden Integration elektronischer und informationstechnischer Komponenten in den mechanischen Grundaufbau der Maschinen geführt. Die Eigenschaften des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine werden damit, neben dessen mechanischen Eigenschaften, vor allem von der installierten Steuerungs- und Antriebstechnik bestimmt. Aufgabe der Werkzeugmaschinenentwicklung ist es, dieses komplexe, mechatronische System an jede neue Aufgabenstellung in möglichst kurzer Zeit anzupassen. Die hierauf abgestimmte Modellbildungsmethodik wird im Folgenden vorgestellt.

8.1.1 Anforderungen an das mechatronische Gesamtmodell

Tabelle 8-1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Aufgabenstellungen bei der Auslegung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen. Die zugehörigen Tätigkeiten können dabei bestimmten Fachbereichen zugeordnet werden. Dies wurde zur Gliederung der Aufgabenstellungen in der Tabelle genutzt. Des Weiteren erfolgt eine Zuordnung zu der Entwicklungsphase. Ausgehend von den verschiedenen Aufgabenstellungen werden die Parameter und physikalischen Eigenschaften des realen Systems zusammengestellt und diskutiert, die darauf Einfluss haben. Ziel ist es, alle wichtigen Einflussgrößen zusammenzutragen, um deren Modellbildung geeignet berücksichtigen zu können.

8.1.1.1 Einflussgrößen der Mechanik

Gestalt und kinematisches Verhalten von Werkzeugmaschinen

Ziel der Konzeptionsphase im Maschinenbau ist die Auswahl der Maschinenkinematik, die Verteilung der erforderlichen Bewegungssachsen auf die unterschiedlichen Maschinenkomponenten, die Festlegung ihrer Lage im Raum sowie die Auswahl von Führungs- und Antriebsprinzipien. Ergebnis der Konzeptionsphase

sind erste, maßstäbliche Skizzen der Maschine, gemäß derer die Aufgaben verteilt und zum weiteren Entwurf an die jeweiligen Abteilungen vergeben werden.

Anforderungen, die in dieser Phase an das Modell des virtuellen Prototypen gestellt werden, sind die Beschreibung der Geometrie einschließlich zugehöriger Dimensionen (soweit bereits bekannt) und kinematischer Zusammenhänge. Der Mechanik dienen diese Informationen während der Konzeptionsphase der Überprüfung der Kollisionsfreiheit und des erreichbaren Arbeitsraums des Maschinenkonzepts. Derartige Untersuchungen sind insbesondere bei Maschinen mit Parallelkinematiken von großer Bedeutung. Vonseiten der Elektronik können die Informationen über Geometrie und kinematische Anordnung zur Spezifikation der Steuerungs- und Leistungselektronik bzw. zur Spezifikation der Sensorik genutzt werden.

	Mechanik	Elektronik	Informations-technik
Konzeption	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung der Geometrie • Kinematische Studien (z.B. Arbeitsraum) • Kollisionsuntersuchungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Spezifikation von Steuerung und Leistungselektronik • Spezifikation der Sensorik 	
Entwurf	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung von Lagern und Führungen • Optimierung der Strukturmechanik hinsichtlich Eigenfrequenzen und Eigenformen • Optimierung der Laststeifigkeit der Strukturmechanik • Auslegung der Antriebsmechanik 	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl von Steuerung und Leistungselektronik • Auswahl der Sensorik • Parametrierung der Regelung (Auswahl von Filtern, Vorsteuerverfahren) • Optimierung der Regelungsparameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Bewegungsdynamik durch steuerungstechnische Maßnahmen (Bahnvorkorrektur) • Erstellen und optimieren von NC-Programmen • Erstellen und optimieren von SPS-Programmen

Tabelle 8-1: Klassische Aufgabenstellungen im Rahmen der Entwicklung von Werkzeugmaschinen in Bezug auf die Bewegungsdynamik; sortiert nach den Fachbereichen, in die die zugehörigen Komponenten fallen, und zugeordnet zu der Entwicklungsphase.

Ziel der Entwurfsphase ist die detaillierte Untersuchung und Abstimmung des Konzepts an die jeweiligen Zielgrößen des Produkts. Dabei müssen folgende Eigenschaften analysiert werden können.

Statisches Verhalten der Strukturmechanik von Werkzeugmaschinen

Hierzu zählt die Ermittlung von Spannungen und Verformungen in Werkzeugmaschinen, die durch Werkstück- und Werkzeuggewichte, Prozess- und Spannkräfte (Drehmaschine: Spannen eines Werkstücks zwischen Spitzen) hervorgerufen werden. Die Folgen einer ungenügenden statischen Steifigkeit machen sich vorwiegend als Formfehler an den Werkstücken bemerkbar. Für die Berechnung der statischen Verformungen müssen die Mechatronik-Simulationsbausteine über ein geeignetes Modell verfügen.

Dynamisches Verhalten der Strukturmechanik von Werkzeugmaschinen

Im Gegensatz zur statischen Belastung versteht man unter dynamischer Belastung auf die Maschine einwirkende, sich zeitlich verändernde äußere und/oder innere Kräfte, die periodische Wechselverformungen an der Maschine hervorrufen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Schwingungen der Maschine, die eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück verursachen und somit die Fertigungsqualität beeinflussen. Als Schwingungsursachen sind vornehmlich fremderregte und selbsterregte Schwingungen zu nennen. Eine typische Ursache für fremderregte Schwingungen liegt darin, dass neben dem konstanten Anteil der Zerspankraft, wechselnde Störkräfte auf die Maschinenstruktur wirken. Dies können Störkräfte aus wechselnden Schnittkräften beim Fräsen (ungleichmäßiger Zahneingriff), Überrollkräfte an Wälzlagern, Unwuchten und Exzentrizitäten sein (*Heisel & Feinauer 1999; Zäh 1994*). Fremderregte Schwingungen sind daran zu erkennen, dass das Maschinen- system mit der Frequenz der Anregungskräfte schwingt. Dabei kann es zu besonders großen Amplituden kommen, wenn die Anregungsfrequenz in der Nähe oder in einer Eigenfrequenz liegt. Selbsterregte Schwingungen entstammen zwar ebenfalls aus dem Zerspanprozess, werden im Gegensatz zu den fremderregten Schwingungen aber nicht durch periodische Störkräfte, sondern durch Instabilitäten im Zerspanprozess (Aufbauschneidenbildung, fallende Schnittkraft-Schnittgeschwindigkeit-Charakteristik, Regenerativeffekt) hervorgerufen. Im Falle einer selbsterregten Schwingung schwingt die Maschinenstruktur immer in der Nähe einer oder mehrerer Eigenfrequenzen.

Im Prozess auftretende Schwingungen können, ohne Änderungen an der Maschinenstruktur vornehmen zu müssen, nur durch Veränderung der technologischen Parameter des Zerspanprozesses (Reduzierung der Drehzahl, Werkzeuge mit anderer Anordnung der Schneiden) beseitigt werden. Dies kann dazu führen, dass der Leistungsbereich einer Werkzeugmaschine durch dynamische Störungen stark eingeschränkt wird. Da eine Werkzeugmaschine für die Bearbeitung unter sehr unterschiedlichen Zerspan-

bedingungen einsetzbar sein sollte, kommt der Verbesserung des dynamischen Verhaltens einer Werkzeugmaschine große Bedeutung zu. Hierzu ist die Kenntnis der Eigenfrequenzen und Eigenformen sehr wichtig.

Einfluss von Nichtlinearitäten in der Mechanik

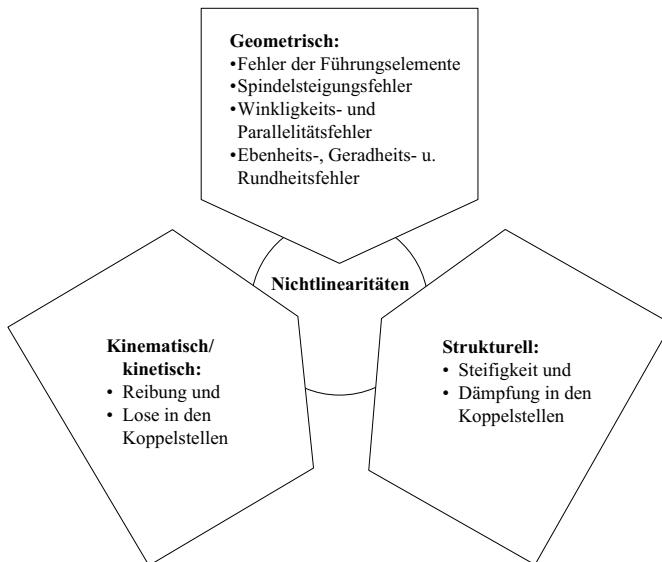


Abbildung 8-1: Nichtlinearitäten in der Mechanik

Eine wichtige Ursache für Abweichungen von der Sollbahn bei mehreren, funktional voneinander abhängenden Vorschubachsen liegt in den in der Mechanik verborgenen Nichtlinearitäten begründet. Konventionelle Werkzeugmaschinenvorschubantriebe bestehen aus einem Motor sowie den mechanischen Übertragungselementen Kupplungen, Getriebe, Führungen, Lager und Kugelgewindetrieb. In all diesen Einzelementen liegen geometrische, kinematisch/kinetische und strukturelle Nichtlinearitäten verborgen, die ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit haben (Abbildung 8-1).

Die bisherigen Anforderungen an die Modelle entstammen im Wesentlichen aus der quasistatischen Betrachtung der Strukturmechanik der Werkzeugmaschine, d. h. die Maschinenachsen führen keine Vorschubbewegung aus oder bewegen sich nur in einem kleinen Bereich um einen Arbeitspunkt. Eine Reihe weiterer physikalischer Eigenschaften des realen Systems gilt es zu berücksichtigen, wenn große

Verfahrbewegungen der Maschinenkomponenten untersucht werden sollen. Diese entstammen aus der Bahnerzeugung und der Regelung.

8.1.1.2 Einflussgrößen der Bahnerzeugung

Abbildung 8-2 zeigt den Prozess der Bahnerzeugung ausgehend vom NC-Programm bis hin zur Ausgabe der achsspezifischen Lagesollwerte. Die Bahnerzeugung hat großen Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, setzt sich die Bahnerzeugung aus einer Vielzahl an Einzelschritten zusammen. Durch optimale Parametrierung des NCK lässt sich die maximale Leistung eines Vorschubantriebs deutlich steigern. Im Folgenden sind die wesentlichen Funktionen eines NCK aufgeführt, die Einfluss auf die Lagesollwerterzeugung haben und daher im Simulationsmodell Berücksichtigung finden müssen:

- Geschwindigkeits- oder beschleunigungsgesteuerte Führungsgrößenerzeugung
- Ruckbegrenzung
- Glättung unstetiger Bahnübergänge (Look Ahead)
- Bahnsteuerbetrieb mit programmierbarem Überschleifabstand
- Sollbahnvorverzerrung
- Spline Interpolation
- Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung

Die geschwindigkeits- oder beschleunigungsgesteuerte Führungsgrößenerzeugung ist ein Verfahren, das darauf beruht, den zeitlichen Verlauf der Lageführungsgröße zu optimieren. Dabei werden verschiedene Randbedingungen, wie maximal zulässige Achsgeschwindigkeit und -beschleunigung, programmierte Vorschub, programmierte maximaler Ruck und zulässige Bandbreite des Antriebsstrangs, bei der Generierung des zeitlichen Verlaufs der Lageführungsgröße berücksichtigt. Die Look-Ahead-Funktion analysiert mehrere Sätze im Voraus auf die programmierten Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen und ermittelt ein Optimum der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Bei tangentialen Satzübergängen wird z. B. über die Satzgrenze hinaus beschleunigt und abgebremst, so dass keine Geschwindigkeitseinbrüche entstehen. Bei scharfkantigem Bahnverlauf wird das Verschleifen der Kontur auf ein programmierbares Wegmaß reduziert (Bahnsteuerbetrieb mit programmierbarem Überschleifabstand). Um die dynamische Bahnverzerrung auf Grund des Übertragungsverhaltens des Antriebsstrangs ausgleichen zu können, wurde das Verfahren der Sollbahnvorverzerrung entwickelt. Dieses Verfahren ändert anhand der genauen Kenntnisse der Führungs- und

Störübertragungsfunktionen sowie der Kenntnis der Störkräfte die Sollbahn so, dass die Bahnverzerrung des Antriebssystems kompensiert wird.

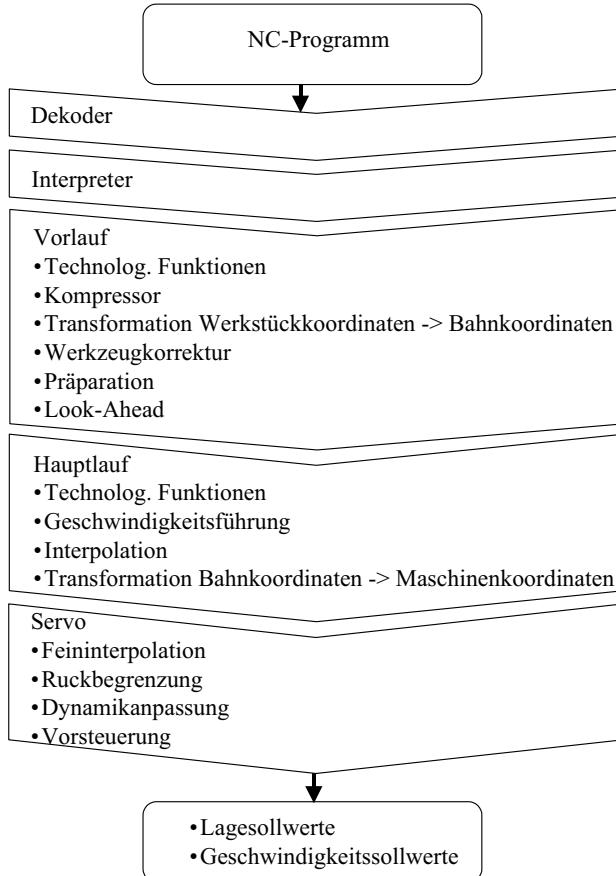


Abbildung 8-2: Ablauf der Bahnerzeugung ausgehend vom NC-Programm bis hin zur Ausgabe der Lagesollwerte

Moderne NC-Steuerungen verfügen neben den klassischen Interpolationsverfahren Gerade und Kreis über die Möglichkeit der Spline-Interpolation. Die Spline-Interpolation bietet insbesondere bei der Bearbeitung von Freiformflächen gegenüber den herkömmlichen Interpolationsverfahren einige Vorteile. Der entscheidende Vorteil ist, dass die Übergänge zwischen den einzelnen Sätzen stetig sind, wodurch die Mechanik

der Werkzeugmaschine geschont wird. Schleppfehlerbedingte Ungenauigkeiten der Kontur lassen sich durch die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung nahezu eliminieren. Dadurch ergibt sich auch bei einer hohen Bahngeschwindigkeit eine hervorragende Bearbeitungsgenauigkeit.

8.1.1.3 Einfluss der Regelung

Einen wesentlichen Einfluss auf das Bahnverhalten hat die Parametrierung der Lageregelung. Die Maßnahmen zur Bahnfehlerreduzierung im Bereich der Regelung bestehen im Wesentlichen in der Optimierung der Reglerparameter (z. B. K_v-Faktor) und der Verbesserung der Regelungsstruktur, z. B. durch Einbau von Filtern. Denn Filter, die mechanische Resonanzen ausblenden oder Sollwerte glätten, erlauben eine Steigerung der Geschwindigkeitsverstärkung (*Schlittenhelm 1997*).

In den nun folgenden Kapiteln wird die Simulationsumgebung ausgearbeitet. Zunächst wird der Aufbau der Mechatronik-Simulationsbausteine vorgestellt, die für die Untersuchung der einleitend genannten Aufgabenstellungen unter Berücksichtigung der daraufhin zusammengestellten Einflussparameter benötigt werden.

8.1.2 Definition der Systemgrenzen der für die Auslegung von Vorschub- antrieben erforderlichen Mechatronik-Simulationsbausteine

Die im Rahmen der neuen Vorgehensweise eingeführten Mechatronik-Simulationsbausteine dienen der Strukturierung der mechatronischen Modellbildung. In Anlehnung an die in Kapitel 5.3.1 aufgestellten Regeln und die in Abbildung 8-3 dargestellte Funktionsstruktur eines Standard Werkzeugmaschinenvorschubantriebs kristallisieren sich, bezogen auf eine Vorschubachse, folgende Mechatronik-Simulationsbausteine heraus: Gemäß der Richtlinie, der zufolge sich Zukaufteile als Bausteine eignen, können die Baugruppen NC-Bewegungssteuerung, Antrieb (Regelung und Umrichter) und Servomotor als Mechatronik-Simulationsbausteine identifiziert werden. Die Aufteilung der Mechanik in einzelne Simulationsbausteine orientiert sich an den natürlichen Schnittstellen Schraubverbindungen, Lager und Führungen. Damit haben sich für rotatorische Vorschubantriebe die Bauteile bzw. Baugruppen Kugelgewindespindel inklusive Zahnriemenscheibe, Spindelmutter, Schlitten bzw. Fahrständer und Bett als geeignete Systemgrenzen erwiesen (vgl. Abbildung 4-2). Im Folgenden wird der systematische und durchgängige Aufbau der genannten Mechatronik-Simulationsbausteine beschrieben.

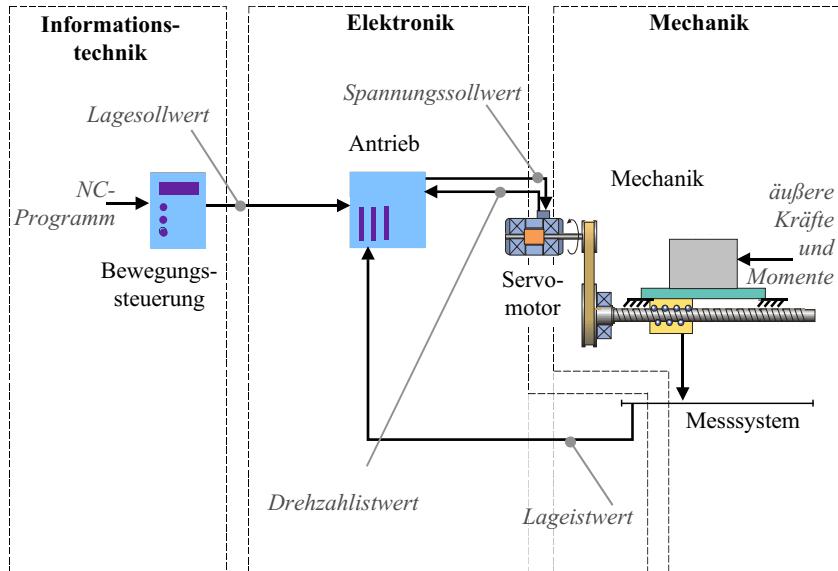


Abbildung 8-3: Aufbau eines Standard Werkzeugmaschinenvorschubantriebs

8.1.3 Modellbildung der Mechatronik-Simulationsbausteine der mechanischen Komponenten

In Tabelle 8-2 sind die physikalischen Eigenschaften der mechanischen Komponenten zusammengestellt, die einen Einfluss auf die Bewegungsdynamik haben. Den physikalischen Eigenschaften sind Simulationsprogramme gegenübergestellt, die Funktionalitäten besitzen, diese physikalischen Eigenschaften geeignet in einem Modell abbilden zu können. Die den Simulationswerkzeugen zu Grunde liegenden Modellbildungsmethodiken wurden bereits in vorangegangenen Kapiteln ausführlich diskutiert. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Vielzahl der Daten der unterschiedlichen Simulationsmethoden gleichen Ursprungs sind. Die Kompatibilität zwischen den Daten einer Komponente wird zum einen durch die Systemgrenze der Mechatronik-Simulationsbausteine erreicht. Der zweite wesentliche Punkt ist jedoch die durchgängige Modellierung der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Sichten eines Mechatronik-Simulationsbausteins. Ziel des folgenden Abschnitts ist es, die durchgängige Modellbildung der Schnittstellen zwischen CAD-, FEM-, MKS- und Kinematiksimulationssicht zu beschreiben. Dies erfolgt zunächst für alle für die Modellbildung der Mechanik wesentlichen mechanischen Schnittstellen — Standardschnittstellen. Zunächst wird die Linearführung betrachtet. Es folgen die

8.1 Aufbau mechatronischer Modelle zur Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen

Modellbildung des Spindelmuttersystems sowie die Modellbildung rotatorischer Lagerungen. Aus den Beschreibungen wird die Systematik ersichtlich, die auf beliebige Schnittstellen übertragen werden kann.

Physikalische Eigenschaften des mechatronischen Systems	Analysewerkzeug
Gestalt	CAD
Statisches Verhalten der Strukturmechanik von Werkzeugmaschinen	FEM
Dynamisches Verhalten der Strukturmechanik von Werkzeugmaschinen	FEM
Kinematik von Werkzeugmaschinen (Kollisionsuntersuchungen, Materialabtrag)	Kinematiksimulation
Untersuchung der Bewegungsdynamik (Kinematik + Trägheitswirkungen der Gestellbauteile)	Starrkörper-MKS
Einfluss mechanischer Nichtlinearitäten in den Koppelstellen auf die Bewegungsdynamik	Starrkörper-MKS
Berücksichtigung des statischen und dynamischen Verhaltens der Strukturmechanik bei Untersuchungen der Bewegungsdynamik	MKS mit flexiblen Körpern

Tabelle 8-2: Zuordnung der realen physikalischen Eigenschaften (Kapitel 8.1.1.1) zu Simulationsmethoden, die geeignet sind, diese entsprechend abzubilden

8.1.3.1 Modellbildung der Schnittstelle "Linearführung"

Ein Kinematikmodell beschreibt die Linearführung als ideale (reibungsfreie, spielfreie) Translation zwischen zwei Starrkörpern. Im Modell wird die Translation durch ein Gelenk zwischen zwei Markern abgebildet. Auf einem Körper kann dabei die Position des Markers frei gewählt werden. Der zugehörige Marker auf dem zweiten Körper ist deckungsgleich zu platzieren. Kurzum, die Kinematiksimulation schreibt keine besonderen Regeln für die Modellbildung vor und ist deshalb bezüglich der Wahl der Position der Marker äußerst flexibel.

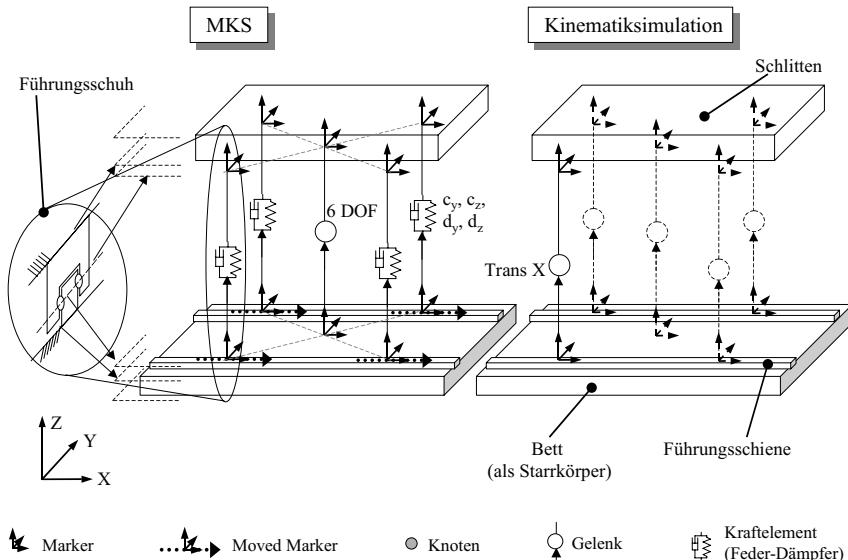


Abbildung 8-4: Durchgängige Modellbildung eines Linearführungssystems (Teil 1)

Anders verhält es sich bei der Positionierung der Marker im MKS-Modell. Hier werden entsprechend der Position des Markers die an dieser Stelle auftretenden Kräfte und Momente berechnet, so dass die Positionierung direkte Auswirkungen auf die Kraftwirkung hat und von daher wohl überlegt sein muss. Das Linearführungssystem ist so zu modellieren, dass die sechs Freiheitsgrade der Linearführung korrekt berücksichtigt werden (Weck 1996, S. 84ff.). Bezuglich der translatorischen Freiheitsgrade muss die Auf- und Seitenlaststeifigkeit des Führungssystems abgebildet werden. Zudem müssen sich die rotatorischen Bewegungen — Rollen, Stampfen und Gieren — eines über eine Linearführung gelagerten Bauteils simulieren lassen. Die MKS-gerechte Modellbildung eines Linearführungssystems ist in Abbildung 8-4 dargestellt. Da in der MKS jeder Körper über mindestens ein Gelenk mit einem anderen Körper verbunden sein muss, werden Bett und Schlitten zunächst über ein Gelenk mit sechs Freiheitsgraden miteinander verbunden. Das physikalische Verhalten der Linearführung, das aus der Verbindung Führungsschuh - Führungsschiene resultiert, wird durch eine geeignete Kombination aus Feder-Dämpfer-, Reibkraft- und Stick-Slip-Elementen nachgebildet. Als Angriffspunkt für die Elemente wird dabei der Mittelpunkt in der Krafteinleitungsebene eines jeden Führungsschuhs gewählt (siehe Abbildung 8-4). Um den veränderlichen Kraftangriffspunkt der Führungsschuhe gegenüber der Führungsschiene korrekt berücksichtigen zu können, wurde als Koppelpunkt ein so genannter Moved Marker gewählt. Dieser Markertyp kann seine Position in Abhängigkeit von einer Eingangsgröße ändern. Um das Führungsverhalten

modellieren zu können, wird als Eingangssignal für den Moved Marker die Zustandsgröße des Sechs-Freiheitsgrade-Gelenks in Translationsrichtung genutzt.

In der FEM interessiert hinsichtlich der Modellbildung der Linearführung vor allem die realistische Abbildung der Krafteinleitung aus dem Führungssystem in die damit verbundenen Komponenten. Hierzu wird in der FEM-Modellbildung (*Schneider 2000*) im Mittelpunkt der Flanschfläche von Führungsschuh bzw. -schiene und Gestellbauteil ein Koppelknoten erzeugt. Die in der Flanschfläche des Führungsschuhs bzw. der Führungsschiene auf den Gestellbauteilen liegenden Knoten werden über kinematische Zwangsbedingungen mit diesem für die Krafteinleitung vorgesehenen Koppelknoten verbunden. Das Federelement, das zur Abbildung der Steifigkeit des Führungsschuhs eingebaut wird, greift ebenfalls an diesen beiden neu erzeugten Koppelknoten an (Abbildung 8-5).

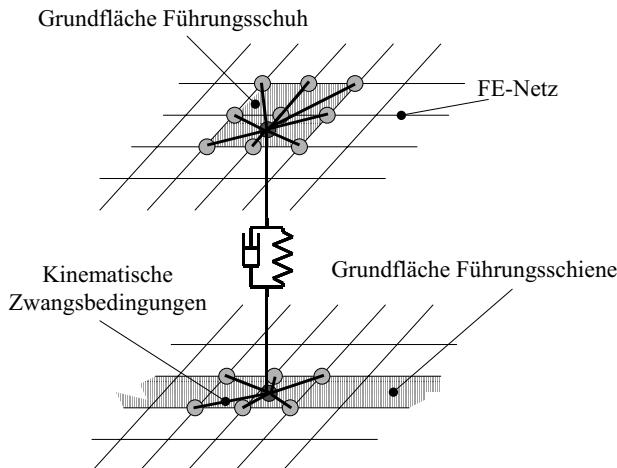


Abbildung 8-5: Modellbildung eines Führungsschuhs in der FEM

Damit die Durchgängigkeit zwischen FEM-Modell und MKS-Modell sichergestellt ist, ist es erforderlich, dass der für die Krafteinleitung erzeugte Knoten nicht mehr wie bisher in der Flanschfläche, und damit direkt auf den Komponenten, sondern entsprechend der MKS-Modellbildung an der tatsächlichen Stelle der Krafteinleitung erzeugt wird (s. Abbildung 8-6/Detail X und Y). Auf das FEM-Modell hat dies keine Auswirkungen. Da aber mit Hilfe der MKS unter anderem die Führungssysteme ausgelegt werden, ist es erforderlich, für die MKS die Stelle der Krafteinleitung exakt zu berücksichtigen. Zudem sind in Abbildung 8-6 zwei weitere Marker mit zugehörigem Knoten an den Stellen zu erkennen, an denen im MKS-Modell der

Gelenkangriffspunkt liegt. Diese haben für das FEM-Modell keine Bedeutung, sind aber hinsichtlich Durchgängigkeit bereits im FEM-Modell zu berücksichtigen. Sollte der Körper nämlich einmal als flexibler Körper in einem MKS-Modell benötigt werden, so müssen die Knoten als Ankoppelpunkte für das Gelenk zur Verfügung stehen.

Abbildung 8-6: Durchgängige Modellbildung eines Linearführungssystems (Teil 2)

Wurde die Führung in der FEM gemäß dieser Vorgehensweise modelliert, können die aus einer FEM-Berechnung vorliegenden FEM-Daten des Mechatronik-Simulationsbausteins direkt für die Integration der Komponente als flexibler Körper in ein MKS-Modell genutzt werden. Die flexible Modellbildung der an ein Linearführungssystem angrenzenden Komponenten ist von besonderem Interesse, da so der Einfluss der Schlittenstellungen auf das statische und dynamische Bauteilverhalten berücksichtigt werden kann. Für das flexible MKS-Modell bedeutet dies, dass sich aufseiten der

- 88 -

Führungsschiene der Kraftangriffspunkt bei einer Bewegung mit der Zeit verschiebt. Der veränderliche Kraftangriff auf dem flexiblen Körper wird in der MKS korrekt berücksichtigt, wenn der aus dem Starrkörpermodell bekannte Moved Marker in der Ausgangsposition mit einem Knoten des FEM-Netzes zusammenfällt und in Richtung der Führungsschiene weitere Knoten liegen. Dies ist durch die MKS-gerechte FEM-Modellbildung des Führungssystems (Abbildung 8-6/Detail Y und Z) sichergestellt.

Die Beschreibung des Bauteilverhaltens in Abhängigkeit von dem Kraftangriffspunkt erfolgt durch eine modale Approximation, d. h. durch die Beschreibung des Bauteils durch seine Eigenformen und zusätzliche statische und dynamische Moden, die so genannten Frequency Response Modes (FRMs). Bei der Berechnung der Eigenfrequenzen ist darauf zu achten, dass das Bauteil über den Knoten, der für die Anbindung des MKS-Gelenks im FEM-Modell vorgesehen wurde, mit dem Inertialsystem verbunden ist. Die Freiheitsgrade in dieser Verbindung entsprechen dabei den Freiheitsgraden dieser Verbindung im MKS-Modell (hier: sechs Freiheitsgrade, entsprechend: free-free FEM-Berechnung). Die FRMs dienen der Berücksichtigung einer auf die Komponente wirkenden äußeren Last. Die FRMs müssen entsprechend für alle Knoten, an denen Kräfte angreifen, separat berücksichtigt werden. Für das Führungssystem werden demzufolge die in einem Führungsschuh wirkenden Auflast- und Seitenlastkräfte berücksichtigt. Entsprechend sind für die vier repräsentativen Knoten der Führungsschuhe sowie für alle auf der Führungsschiene liegenden Knoten FRMs zu berechnen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Linearführung durch 10 Marker (Führungsschuh 1/2/3/4, vier deckungsgleiche Marker auf der Führungsschiene und zwei Marker für das Gelenk) beschrieben werden kann. Werden diese 10 repräsentativen Marker bereits im CAD-Modell, dem Ursprung von Kinematik-, FEM- und MKS-Sicht, angebracht, so ist die durchgängige Modellierung der Schnittstelle in allen mechanischen Sichten sichergestellt. Wie für die Linearführung müssen in Bezug auf Durchgängigkeit für alle anderen mechanischen Schnittstellen einheitliche Regeln aufgestellt werden. Diese werden im Folgenden vorgestellt. Dabei werden die Schnittstellen Kugelgewindetrieb - Spindelmutter und Spindelmutter - Schlitten/Ständer zugleich betrachtet, da die Modellbildung der Kraftübertragung der Kugelgewindespindel auf den Schlitten so deutlicher wird. Den Abschluss macht die Vorstellung der Modellbildung rotatorischer Lager.

8.1.3.2 Modellbildung der Schnittstellen des Spindel-Mutter-Systems

Die durchgängige Modellbildung eines Kugelgewindetriebs wird in Abbildung 8-7 veranschaulicht. Auf die Darstellung der Modellbildung des Kinematikmodells wurde verzichtet, da die Modellbildung der Kinematik, wie bereits erläutert, keiner besonderen Regeln bedarf und infolgedessen hinsichtlich Durchgängigkeit auf ein Markerpaar aus der MKS zurückgegriffen werden kann. Das FEM-Modell der Kugelgewindespindel geht aus dem MKS-Modell mit flexiblen Körpern hervor,

weshalb auch das FEM-Modell nicht explizit abgebildet wurde. Zunächst wird das Starrkörper-MKS-Modell diskutiert. Das für den Kugelgewindetrieb charakteristische Verhalten der Wandlung einer Rotation in eine Translation wird durch ein Schraubengelenk modelliert. Der Schlitten ist über ein Feder-Dämpfer-Element mit der Spindelmutter verbunden. Das Feder-Dämpfer-Element hat dabei zum einen die Funktion der rotatorischen Fesselung der Spindelmutter. Zum anderen beschreibt die axiale Steifigkeitsangabe die resultierende Steifigkeit der Axialsteifigkeiten aus der Verbindung Spindel – Spindelmutter sowie aus der Verschraubung der Spindelmutter mit dem Schlitten.

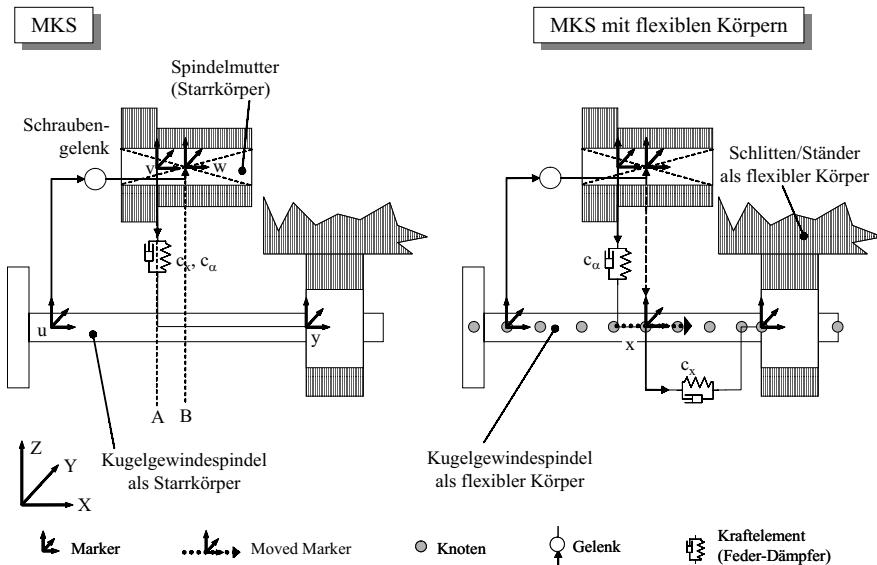


Abbildung 8-7: Durchgängige Modellbildung der Schnittstellen Kugelgewindespindel - Spindelmutter und Spindelmutter - Schlitten/Ständer

Auch bei der Modellbildung der Kugelgewindespindel als flexibler Körper spielt der veränderliche Kraftangriffspunkt der Spindelmutter gegenüber der Kugelgewindespindel eine entscheidende Rolle. Hierfür bietet sich wieder die Modellbildung mit Hilfe eines Moved Markers an. Der Moved Marker auf der Kugelgewindespindel bezieht die Information über den Kraftangriffspunkt aus der Translation der Spindelmutter. Die bewegte Schlittenmasse wird über ein Feder-Dämpfer-Element mit dem Moved Marker verbunden. Damit das elastische Verhalten der Spindel korrekt berechnet wird, müssen bei der Berechnung des Datensatzes für die flexible Spindel für die Knoten entlang der Spindelachse FRMs für die Zug-/Druckbelastung sowie für eine Torsionsbelastung berechnet werden.

Die für die durchgängige Modellbildung der Schnittstellen Spindel - Spindelmutter und Spindelmutter - Schlitten erforderlichen Marker sind in Tabelle 8-3 zusammengestellt.

Schnittstelle	Marker	Mechatronik-Simulationsbaustein	Funktion	Position
Kugelgewinde-spindel - Spindelmutter	u	Kugelgewindespindel (KGSp)	Marker 1 für Schraubengelenk	B (Repräsentative Stelle für die Schraubverbindung; i.d.R. Schlittennulllage)
	w	Spindelmutter	Marker 2 für Schraubengelenk	B
Spindelmutter - Schlitten/ Ständer	v	Spindelmutter	Kraftübertragung in der Schraubverbindung	A (Schraubverbindung Spindelmutter - Schlitten/Ständer)
	x	Kugelgewindespindel	Repräsentative Stelle für die Kraftübertragung zwischen Spindelmutter und KGSp	B
	y	Schlitten/Ständer	Kraftübertragung in der Schraubverbindung	A

Tabelle 8-3: Übersicht über die zur durchgängigen Modellbildung der Schnittstellen Spindel - Spindelmutter und Spindelmutter - Schlitten/Ständer erforderlichen Marker

8.1.3.3 Modellbildung der Schnittstelle "Rotationslager"

Abschließend wird die Modellbildung rotatorischer Lagerungen vorgestellt. Als Beispiel hierfür wurde die Lagerung einer Kugelgewindespindel ausgewählt, da hier die zwei gebräuchlichen Modellbildungsvarianten in einem System auftauchen (Abbildung 8-8/Position A und B). Kugelgewindespindeln werden heute in der Regel beidseitig gelagert. Über die beidseitige Lagerung werden die Spindeln meist noch vorgespannt. Für die Beschreibung einer rotatorischen Lagerung müssen damit

generell folgende Steifigkeiten nachgebildet werden können: Axialsteifigkeiten c_x , Radialsteifigkeiten c_y , c_z und Biegesteifigkeiten c_β , c_γ .

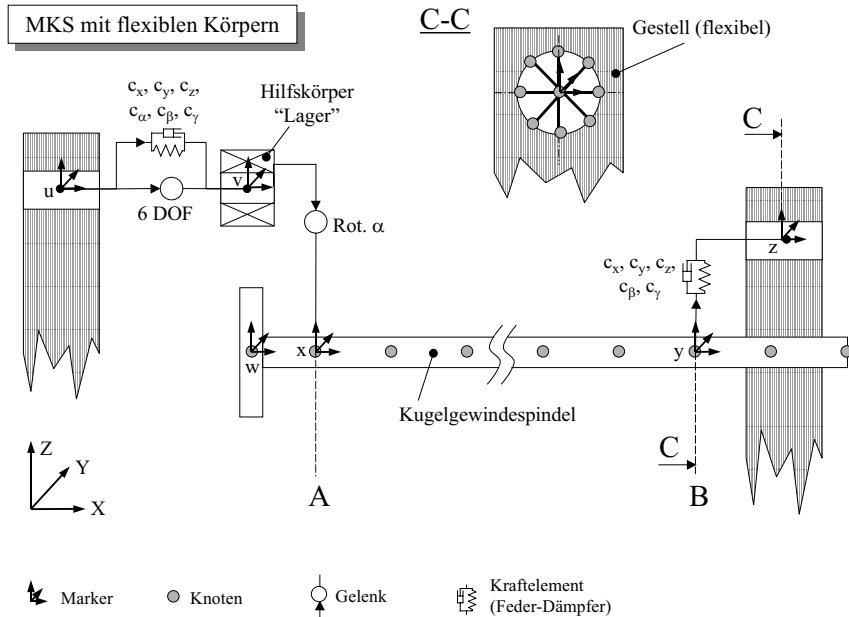


Abbildung 8-8: Durchgängige Modellbildung rotatorischer Lagerungen

Bezüglich der Umsetzung in einem MKS-Modell gilt es zu bedenken, dass in MKS-Modellen nach Möglichkeit kinematische Schleifen² zu vermeiden sind. Daher wird die Kugelgewindespindel nur an Position A über ein Gelenk mit der lagernden Komponente verbunden. Die Modellbildung der Lagerung an Position A soll zunächst genauer betrachtet werden. Es soll weiterhin berücksichtigt werden, dass der Antrieb der Kugelgewindespindel häufig über eine Getriebestufe erfolgt. Die typische Vorgehensweise zur Modellbildung einer Getriebestufe aus MKS-Sicht ist die Modellbildung der Getriebestufe als Kraftelement. In diesem Fall erfolgt die

² Sonderfall eines MKS-Modells. Normalerweise darf jeder Körper eines MKS-Modells über maximal ein Gelenk mit einem in der kinematischen Kette nachfolgenden Körper verbunden werden. Im Sonderfall einer kinematischen Schleife (geschlossene kinematische Kette) müsste ein Körper mit mehr als einem Nachfolgekörper über Gelenke verbunden werden. In diesem Fall müssen spezielle Gelenke verwendet werden, die dies erlauben.

Krafteinleitung der Getriebestufe in die Kugelgewindespindel über den Marker w. Einzige Einbauvoraussetzung für das Kraftelement „Getriebestufe“ ist, dass die als An- und Abtriebswelle der Getriebestufe wirkenden Körper rein rotatorisch gelagert sind. Daher wurde die in Abbildung 8-8 dargestellte Modellbildung über den Hilfskörper „Lager“ gewählt. Die Kugelgewindespindel ist über ein reines Rotationsgelenk mit dem Hilfskörper verbunden. Um die Freiheitsgrade des Lagers korrekt abbilden zu können, besitzt der Hilfskörper sechs Freiheitsgrade. Diese werden entsprechend der Steifigkeit des Lagers durch ein Kraftelement wieder eingeschränkt. Die Torsionssteifigkeit c_a repräsentiert dabei eine virtuelle Torsionsfeder, die eine Drehung des Hilfskörpers verhindert. Für die Modellbildung der Lagerung B sind keine besonderen Anstrengungen erforderlich.

Abschließend sei noch auf den Querschnitt C-C hingewiesen, in dem die Anbindung eines Lagers an einen flexiblen Körper dargestellt ist. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, erfolgt die Kraftübertragung von der Spindel auf die die Lagerung aufnehmende Komponente über den Marker z. Der Marker z verteilt die Kräfte wiederum über kinematische Zwangsbedingungen auf Knoten, die in der Schraubverbindung des Lagers mit der das Lager aufnehmenden Komponente liegen.

Damit wurde die durchgängige Modellbildung der Standardschnittstellen zwischen den mechanischen Komponenten beschrieben. Wie jedoch Abbildung 8-3 zu entnehmen ist, stehen die mechanischen Komponenten des realen Systems auch mit Komponenten aus anderen Fachbereichen in Beziehung (hier: Schlittenposition und Motordrehzahl werden an die Antriebsmodule zurückgegeben). Demzufolge müssen die Rückwirkungen auch bei einer mechatronischen Modellierung Berücksichtigung finden können. Hierzu verfügen die mechanischen Simulationsprogramme in der Regel über eine Funktionalität, mit deren Hilfe an Positionen, an denen ein Marker angebracht ist, mechanische Größen abgegriffen werden können. Daher müssen an den Stellen, an denen mechanische Größen benötigt werden, ebenfalls Marker positioniert werden.

8.1.4 Konfiguration mechanischer Modelle

Unter Berücksichtigung der Mechatronik-Simulationsbaustein-spezifischen Systemgrenze und der Regeln für die durchgängige Modellierung der Schnittstellen können die für die Modellierung der unterschiedlichen Sichten benötigten Daten von unterschiedlichen Personen unabhängig voneinander kompatibel erzeugt werden. Über die Schnittstellen sind die simulationsmethodenspezifischen Modelle der Komponenten koppelbar. So lassen sich sehr schnell beliebige kinematische Ketten aufbauen. Des Weiteren ist mit relativ geringem Aufwand ein Wechsel zwischen den verschiedenen Sichten einer Komponente möglich (Abbildung 8-9). Und nicht zuletzt können einzelne Komponenten einfach ausgetauscht und wiederverwendet werden.

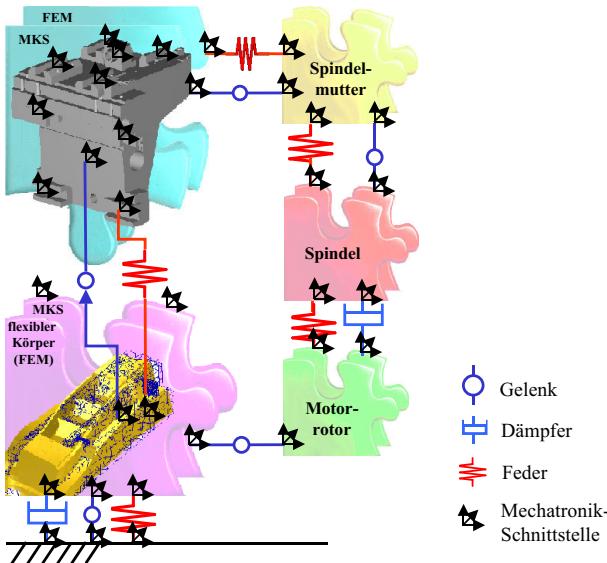


Abbildung 8-9: Konfiguration eines Mechanik-Modells aus den mechanischen Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine (hier: MKS-Modell mit flexiblen Körpern)

8.1.5 Modellbildung des Mechatronik-Simulationsbausteins "Servomotor"

Zum Antrieb der Vorschubantriebsmechanik werden heute trägheitsmomentarme Servomotoren eingesetzt. Infolgedessen wird auch für die Simulationsumgebung ein entsprechender Mechatronik-Simulationsbaustein benötigt. Wie aus Abbildung 8-3 hervorgeht, fällt der Mechatronik-Simulationsbaustein "Servomotor" in den Fachbereich der Mechanik und der Elektronik. Aus mechanischer Sicht besteht der Servomotor aus einem Gehäuse und einem darin gelagerten Rotor. Die Elektronik betrachtet die Erzeugung des am Rotor angreifenden Moments in Abhängigkeit von der vom Umrichter erzeugten Spannung. Entsprechend verfügt der Mechatronik-Simulationsbaustein "Servomotor" über mechanische und elektronische Sichten. Die Trägheitseigenschaften des Rotors werden bei der mechanischen Modellbildung berücksichtigt. Diese erfolgt analog der oben vorgestellten Komponenten. Als Nächstes wird die elektronische Modellbildung betrachtet.

Zur Erzeugung des von der Regelung vorgegebenen Sollmoments wird, wie bereits von *Eubert (1992)*, *Weck (1995)* und *Zirn (1996)* vorgeschlagen, das Modell des

permanenterregten Gleichstromnebenschlussmotors verwendet (Abbildung 8-10). Dies ist zulässig, da der permanenterregte Gleichstromnebenschlussmotor ein ähnliches Verhalten wie der bei Vorschubantrieben übliche, mit symmetrischen, sinusförmigen Strömen gespeiste Synchronservomotor aufweist (Papiernik 1996, S. 399; Weikert 2000, S. 34). Die zur Beschreibung des Gleichstromnebenschlussmotors mit konstanter Felderregung notwendigen Gleichungen sind nachfolgend zusammengestellt:

Spannungsansatz nach Kirchhoff für den Ankerkreis:

$$L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + R_A \cdot i_A = u_A - u_{ind} \quad (8-1)$$

mit

$$\bullet \text{ induzierter Gegenspannung } u_{ind} = K_E \cdot \omega_M \quad (8-2)$$

$$\bullet \text{ abgegebenes Motormoment } M_{Motor} = K_T \cdot i_A \quad (8-3)$$

Aus Gleichung 8-3 resultiert die Proportionalität zwischen dem durch die Ankerwicklungen fließenden Strom und dem Motormoment. Der Strom stellt sich entsprechend der an den Wicklungen des Ankers anliegenden Spannung ein (Gleichung 8-1). Zudem wird aus Gleichung 8-2 ersichtlich, dass sich die Ankerspannung um die durch die Induktivität des Motors erzeugte Gegenspannung u_{ind} reduziert, so dass effektiv nur die Spannung $u_A - u_{ind}$ zur Momentenbildung an den Wicklungen des Motors anliegt. Ferner gilt die Momentenbilanz,

$$M_{Motor} = M_W + M_B = M_W + J_{ges} \cdot \frac{d\varphi_{Motor}}{dt} = M_W + (J_{Motor} + J_{Fremd}) \cdot \frac{d\varphi_{Motor}}{dt} \quad (8-4)$$

mit

- M_W Lastmoment
- M_B Beschleunigungsmoment
- J_{Motor} Trägheitsmoment des Motorrotors
- J_{Fremd} auf die Motorwelle bezogenes Trägheitsmoment der Antriebsmechanik,

wobei die vom Motormoment zu beschleunigende Mechanik (rechte Seite der Gleichung 8-4) im Modell der Mechanik berücksichtigt wird. Der Servomotor ist damit ein ideales Beispiel für einen Mechatronik-Simulationsbaustein, der sowohl über mechanische wie auch eine elektrotechnische Sicht verfügt.

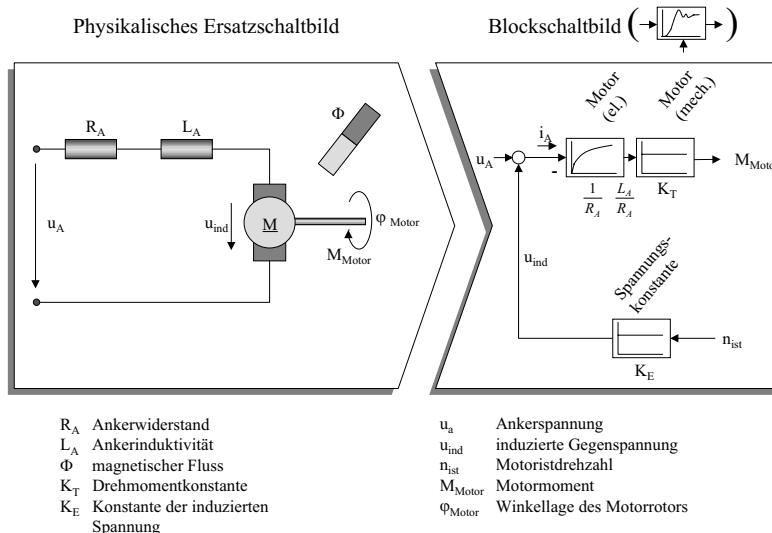


Abbildung 8-10: Physikalisches Ersatzmodell und zugehöriges Blockschaltbild des permanenterregten Gleichstromnebenenschlussmotors

8.1.6 Modellbildung des Mechatronik-Simulationsbausteins "Antriebsmodul"

Bei den Achsregelmodulen handelt es sich um herstellerspezifische, standardisierte Komponenten, die zum Antrieb der unterschiedlichsten Maschinen wie Robotern, Verpackungsmaschinen, Werkzeugmaschinen eingesetzt werden können. Erst durch die Parametrierung werden die Achsregelmodule anwendungsspezifisch abgestimmt. Entsprechend variabel ist der Mechatronik-Simulationsbaustein "Antriebsmodul" aufgebaut. Der parametrisch modellierte Mechatronik-Simulationsbaustein lässt sich über ein Initialisierungsfile an beliebige Achskonfigurationen anpassen.

Aufgabe des Mechatronik-Simulationsbausteins "Antriebsmodul" ist die Erzeugung elektrischer Energie für den Antrieb des Servomotors entsprechend der vom Interpolator für jede einzelne Achse gelieferten Lagesollwerte. Hierzu sind alle daran beteiligten Komponenten, von der in heutigen Steuerungen digital realisierten Antriebsregelung über die Aufnahme aktueller Zustandsgrößen als Istwerte für die Regelung bis hin zum Antriebsverstärker, geeignet abzubilden.

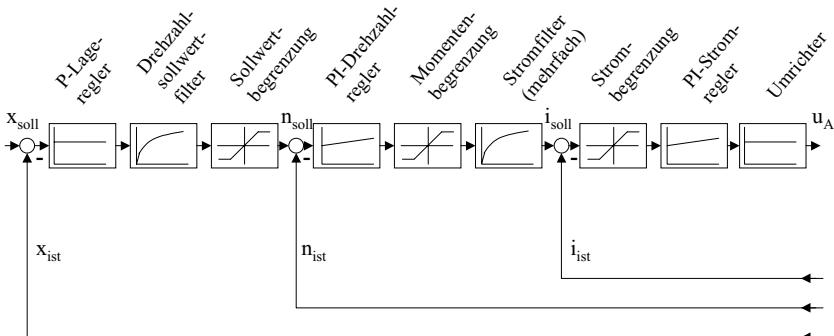


Abbildung 8-11: Modell der kaskadierten Lageregelung

Bei Werkzeugmaschinen hat sich wegen ihrer Robustheit die kaskadierte Lageregelung mit P-Lageregler und unterlagertem PI-Drehzahl- und PI-Stromregelkreis als Antriebsregelung seit langem etabliert. Der Aufbau kann den Projektierungs- und Inbetriebnahmeunterlagen der Steuerungshersteller entnommen werden (*Indramat 1999A; Siemens 1998* usw.). Um den Einfluss der Lageregelung auf die dynamische Bahnabweichung berücksichtigen zu können, wurde die Lageregelung, wie in Abbildung 8-11 dargestellt, modelliert. Neben der prinzipiellen Struktur der kaskadierten Lageregelung enthält das Modell Filter für Drehzahl und Strom sowie Begrenzungen der Sollgrößen von Drehzahl, Moment und Strom. Die in Abbildung 3-2 dargestellte Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung kann durch einmalige (Geschwindigkeitsvorsteuerwert) und zweimalige (Beschleunigungsvorsteuerwert) Differentiation der Lagesollwerte nach der Zeit und Aufschaltung der Vorsteuerwerte auf die entsprechenden Sollwerte ins Regelungsmodell integriert werden. Das dynamische Verhalten des Umrichters, der die Spannung für den Antrieb des Servomotors durch Pulsweitenmodulation der Zwischenkreisspannung erzeugt, stellt aus Regelungstechnischer Sicht ein Totzeitglied dar. Häufig wird das Totzeitglied für die Simulation durch ein PT_1 - oder P-Übertragungsglied substituiert. In Anlehnung an *Eubert (1992)* wird hier für den Umrichter proportionales Verhalten angenommen, da hierdurch die analytische Zugänglichkeit erleichtert wird.

Die Regelung von Werkzeugmaschinen ist heute digital aufgebaut, d. h. die einzelnen Regelschleifen arbeiten mit festen Taktzeiten. Da die Taktzeiten der Regelkreise im Vergleich zu der kleinsten Zeitkonstante in der Regelstrecke sehr klein sind, ist für die analytische Untersuchung dynamischer Bahnabweichungen die Betrachtung der Lageregelung als zeitkontinuierliches Modell zulässig (*Gao 2000, S. 16*). Um auch mit dem zeitkontinuierlichen Modell die Realität möglichst genau nachzubilden, wird die Schrittweite des Integrators für die Zeitintegration an den Stromregeltakt angeglichen.

8.1.7 Konfiguration eines Elektronik-Modells

An der Vorschubbewegung moderner Werkzeugmaschinen sind heute bis zu fünf NC-Achsen beteiligt. Jede NC-Achse setzt sich aus einem eigenen Antriebsmodul und einem Servomotor zusammen. Aus den vordefinierten Mechatronik-Simulationsbausteinen für diese Komponenten lassen sich elektrotechnische Modelle für beliebige, mehrachsige Achsverbünde zusammensetzen.

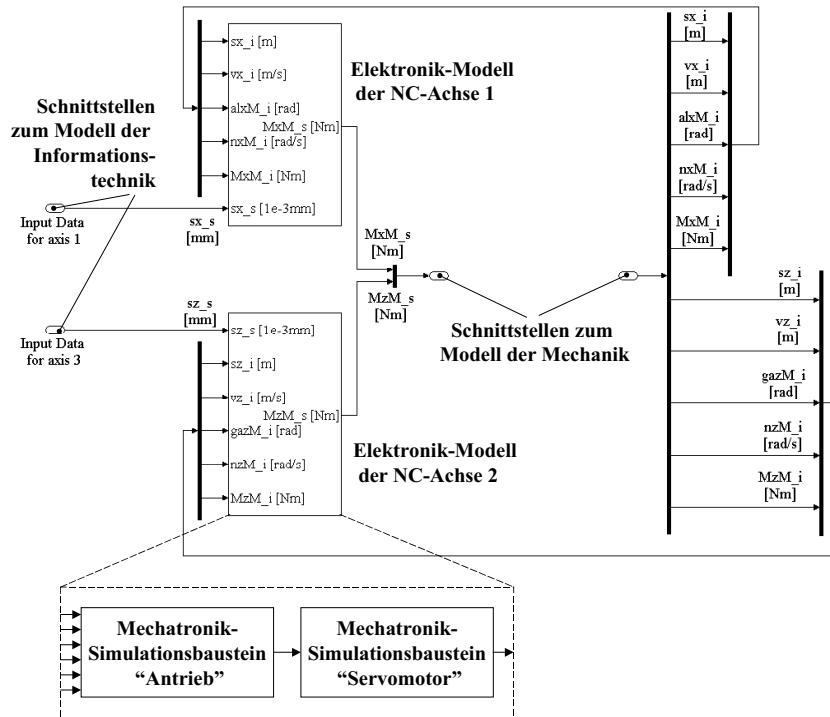


Abbildung 8-12: Modularer Aufbau einer Lageregelung für zwei NC-Achsen aus den vordefinierten Mechatronik-Simulationsbausteinen „Antrieb“ und „Servomotor“ (zum internen Aufbau der Mechatronik-Simulationsbausteine siehe Kapitel 6 im Anhang)

In Abbildung 8-12 ist z. B. das Modell für eine zweiachsige Vorschubbewegung dargestellt. Das Elektronik-Modell einer NC-Achse wird aus den Mechatronik-Simulationsbausteinen „Antrieb“ und „Servomotor“ aufgebaut. Das Elektronik-Gesamtmodell entsteht durch Kopplung von zwei Einzelachsmodellen. Des Weiteren

sind die Schnittstellen des Elektronik-Modells zum Modell der Mechanik und der Informationstechnik abgebildet.

8.1.8 Modellbildung des Mechatronik-Simulationsbausteins "Lagesollwerterzeugung"

Zuletzt wird die Modellbildung der Komponenten aus dem Bereich der Informationstechnik betrachtet. Die Modelle der informationsverarbeitenden Komponenten dienen der Nachbildung der Werkzeugmaschinensteuerung. Diese setzt sich, wie in Abbildung 3-1 gezeigt, aus den zwei Modulen Numerical Control Kernel (NCK) und Programmable Logical Control (PLC) zusammen. Entsprechend dieser natürlichen Aufteilung sind die beiden Mechatronik-Simulationsbausteine NCK und PLC zu entwickeln.

Für die Simulation der Bewegungsdynamik ist dabei insbesondere der NCK von großer Bedeutung. Der dem Lageregler von der NCK vorgegebene zeitliche Verlauf wird auf Grund der hohen dynamischen Anforderungen meist so berechnet, dass die Mechanik in ihrem Grenzdynamicbereich betrieben wird. Die Erzeugung der Lagesollwerte hat somit entscheidenden Einfluss auf die Schwingungsanregung der mechanischen Struktur. Daher ist es für die Untersuchung der Bewegungsdynamik besonders wichtig, über einen Mechatronik-Simulationsbaustein zu verfügen, der möglichst realistische Lagesollwerte erzeugt.

8.1.8.1 Konzepte zur Integration der Lagesollwerterzeugung in die Simulationsumgebung

Bezüglich der Einbindung der Lagesollwerterzeugung in die Simulationsumgebung stehen prinzipiell die in Abbildung 8-13 skizzierten Alternativen zur Verfügung.

Alle bisher vorgestellten Simulationswerkzeuge erfordern ein PC- oder Unix-Betriebssystem. Reale NC-Steuerungen setzen im Gegensatz hierzu ein echtzeitfähiges Betriebssystem voraus. Da Dynamikberechnungen mit den eingesetzten Programmen in Echtzeit nicht möglich sind, verhindert dies zunächst die Integration eines realen NCK in das Simulationsmodell und macht eine Nachbildung erforderlich. Nun zeichnen sich heutige NC-Steuerungen aber durch einen immensen (*Denkena & Liu 2001*) Funktionsumfang aus (Abbildung 8-2), der herstellerspezifisch und zudem öffentlich nicht zugänglich ist. Die exakte Nachbildung wird infolgedessen unmöglich und führt zwangsläufig zu Abweichungen in den Führungsgrößen.

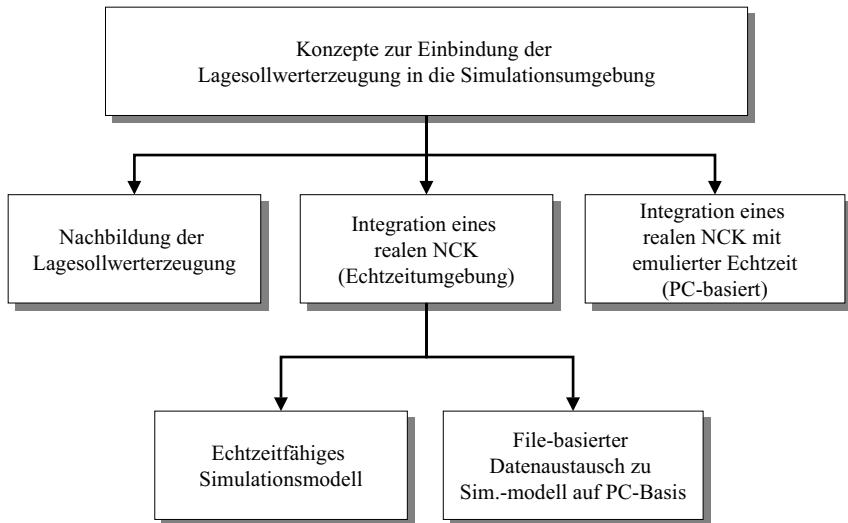


Abbildung 8-13: Konzepte zur Einbindung der Lagesollwerterzeugung in die Simulationsumgebung

Der NCK, auf den es im Hinblick auf die Vorgabe von realistischen Lagesollwerten ankommt, liegt als Software vor. Um ausschließen zu können, dass sich bereits bei der Erzeugung der Eingangsgröße Fehler in das Simulationsmodell einschleichen, muss es das Ziel sein, den realen NCK in die Simulationsumgebung zu integrieren. Da es keine Rückkopplung zwischen Lagesollwerterzeugung und Regelung gibt (vgl. Abbildung 8-3), stehen hierzu prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Erstens die online Anbindung des realen NCK an das Simulationsmodell und zweitens der File-basierte Datenaustausch. Da Werkzeugmaschinensteuerungen ein Echtzeitbetriebssystem erfordern, setzt die Variante eins voraus, dass auch das Simulationsmodell auf ein entsprechendes Echtzeitbetriebssystem portiert wird. Für Variante zwei muss eine Lagesollwertschnittstelle verfügbar sein, auf die von außen zugegriffen werden kann. Bei dieser Variante kann der NCK die Lagesollwerte in seiner realen Umgebung in Echtzeit erzeugen und in eine Datei schreiben. Diese kann anschließend von dem Simulationsmodell eingelesen und auf einem konventionellen PC abgearbeitet werden.

Echtzeitfähigkeitsanforderungen an das mechatronische Simulationsmodell stellen ganz allgemein Probleme dar. Dies wird deutlich, wenn man bedenkt, dass das mechatronische Gesamtmodell einer mehrachsigen Vorschubbewegung in unterschiedlichen Programmen implementiert ist, die untereinander über Schnittstellen in Beziehung stehen. Es müsste der gesamte Simulationsverbund auf ein Echtzeitbetriebssystem portiert werden, was die beteiligten Programme unter Umständen nicht zulassen. Und für den Fall, dass die Modelle auf ein

Echtzeitbetriebssystem portiert werden können, so wird die hierfür spezielle Hardware benötigt. Diese ist sehr teuer und wird daher meist nicht angeschafft.

Als dritte Alternative bietet sich ein realer NCK mit emulierter Echtzeit an. Unter "Emulation" wird ein Verfahren zur Anpassung von Systemen, die auf unterschiedlichen, nicht kompatiblen Anlagen laufen sollen, verstanden. Dabei wird ein Teil oder eine Einheit eines Programms durch eine andere Einheit nachgebildet. Durch das Imitieren akzeptiert die Nachbildung die gleichen Daten, führt die gleichen Funktionen aus und wird von anderen Einheiten wie das Original erkannt. Auf die NC-Steuerung übertragen bedeutet dies, dass für die Simulationsumgebung ein original NCK mit vollem Leistungsumfang und den herstellerspezifischen — für den Anwender unzugänglichen — Besonderheiten zur Verfügung steht. Als einziger Unterschied erzeugt der quasi-reale NCK, im Gegensatz zu dem realen NCK, die Lageführungsgrößen mit emulierter Echtzeit, so dass er auf einer PC-Plattform ablauffähig ist. Des Weiteren ist das Konzept der emulierten Echtzeit prinzipiell auch auf die Regelung übertragbar. Somit wäre es in Zukunft möglich, auf der Basis emulierter Echtzeit, an Stelle der nachgebildeten Regelung (Kapitel 8.1.6), die reale Regelung in das Simulationsmodell einzubinden. Und als letzter Vorteil ist mit einem quasi-real NCK ein Mechatronik-Simulationsbaustein vorhanden, der sich variabel an Simulationswerkzeuge, auch in verteilten Simulationsverbünden, anbinden lässt.

8.1.8.2 Der Virtual Numerical Control Kernel

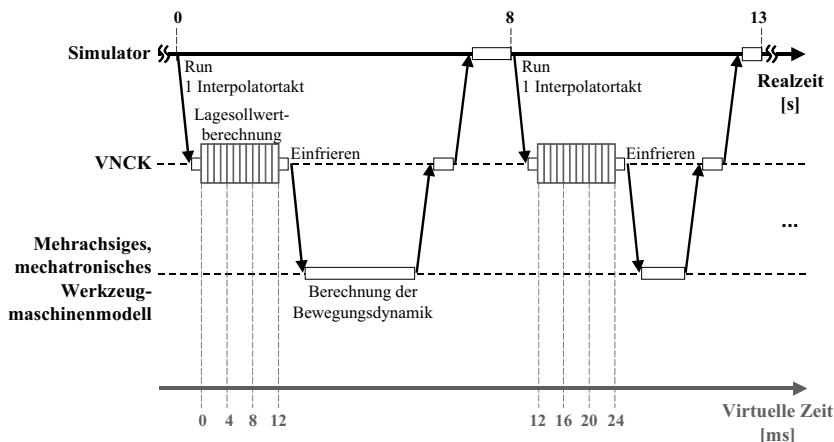


Abbildung 8-14: VNCK mit emulierter Echtzeit

Auf Grund dieser Vorteile wurde der quasi-reale NCK als für die Simulationsumgebung am besten geeignetes und erweiterbares Konzept ausgewählt. Diese Arbeit war daher maßgeblich an der Erarbeitung einer quasi-realnen NC-Steuerung beteiligt. Als Ergebnis existiert für die Simulationsumgebung die in beliebigem, virtuellem Zeitmaßstab auf einer Windows PC-Plattform ablauffähige Nachbildung eines kommerziellen NCK (Baudisch u. a. 2001). Dieser wird im weiteren Verlauf der Arbeit als "Virtual NCK" (VNCK) bezeichnet. Der VNCK der Simulationsumgebung generierte anhand des realen NC-Anwenderprogramms alle notwendigen Führungsgrößen der maschinenspezifischen Vorschubbewegungssachsen, Spindeln und teilweise auch für Werkzeugwechsel- und/oder Zuföhreinrichtungen.

Das der Simulationsumgebung zu Grunde liegende Prinzip der emulierten Echtzeit soll im Folgenden erläutert werden. Die zeitliche Koordination aller Komponenten der Simulationsumgebung erfolgt nach einem Zeitscheibenmodell in einem virtuellen Zeitmaßstab (Abbildung 8-14). Im Einzelnen bedeutet dies, dass ein Simulator der VNCK zyklisch Zeitscheiben zuteilt und damit die Fortsetzung der NC-Anwenderprogrammausführung in der VNCK jeweils für diese Zeitspanne auslöst. Nach Ablauf der vorgegebenen Zeitspanne hält die VNCK die Programmausführung an, überträgt alle relevanten Prozesszustände an den Simulator und friert danach die VNCK internen Systemzustände ein. Damit kann der Fortschritt der Programmausführung in exakten zeitlichen Abständen kontrolliert werden.

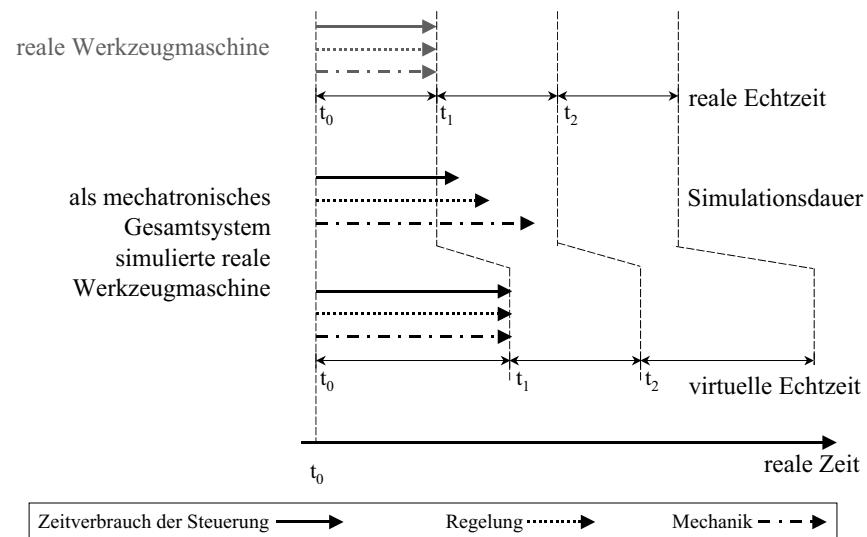


Abbildung 8-15: Gegenüberstellung von realer Echtzeit vs. virtueller Echtzeit

Die VNCK arbeitet im Gegensatz zu einem realen NCK nicht mehr im Echtzeitmaßstab, sondern in einem virtuellen Zeitmaßstab, auf den das Verhalten der realen Steuerung zeitgenau abgebildet wird. Der Vorteil der Abbildung liegt darin, dass der Simulationsumgebung nach dem Einfrieren der VNCK beliebig viel Rechenzeit für Berechnungs- und Visualisierungsaufgaben zur Verfügung steht, gleichzeitig aber Werkzeugmaschinenmodell, interne Modellzustände und VNCK vollständig synchron bleiben (Abbildung 8-15). Somit kann beispielsweise ein Simulationszeitraum von 0,1 Sekunden als Rechenzeit die hundertfache Zeit verbrauchen, ohne dass schnellere Simulationsprozesse bereits weiterlaufen.

Der NCK einer Werkzeugmaschine steht in ständigem Kontakt mit der zweiten Komponente der Werkzeugmaschinensteuerung, der PLC. Will man den exakten zeitlichen Verlauf der NC-Programmausführung simulieren, ist die Einbeziehung der PLC in das Modell unumgänglich.

8.1.9 Konzeption eines Mechatronik-Simulationsbausteins "Virtual Programmable Logic Controller"

Die PLC übernimmt zentrale Koordinationsaufgaben innerhalb der Werkzeugmaschine, wie z. B. die Werkzeugverwaltung, die MMC-Verarbeitung und die Verarbeitung aller technologischen Angaben des NC-Teileprogramms. Damit die PLC dies leisten kann, existiert eine Schnittstelle zwischen NCK und PLC, über die alle relevanten Informationen, wie beispielsweise die Berechnung der Drehung eines Revolvers, schnelle Hilfsfunktionen, Freigabe für Satzwechsel und Daten der Werkzeugverwaltung, ausgetauscht werden. Bei der Anbindung einer VPLC an den VNCK steht man vor der Herausforderung, dass in der Realität die von der PLC für die Programmabarbeitung benötigte Zykluszeit die Zykluszeit des NCK um das 15 bis 40fache übersteigt und die Kommunikation zwischen PLC und NCK teils synchron teils asynchron zu den PLC-Zyklen verläuft. Für die Einbindung der PLC in die Simulation (VPLC) wäre es optimal, wenn auch die PLC auf das oben vorgestellte Zeitscheibenmodell umgestellt werden könnte. Für die Realisierung der Kommunikation zwischen VNCK und VPLC bieten sich dabei prinzipiell zwei Möglichkeiten an:

- Feintaktung: Bei der Feintaktung werden die wichtigen Nahtstellen-Daten jeweils nach einem Interpolator-Takt ausgetauscht. Echte Reaktion auf alarmgesteuerte Funktionen (z. B. T-Funktionen) und genauere Ergebnisse bei Taktzeituntersuchungen (z. B. exakte Berücksichtigung der Nebenzeiten) sind die Vorteile dieses Verfahrens. Demgegenüber stellen das hohe Daten- und Nachrichtenaufkommen und die durch den Austausch verursachte schlechtere Performance wesentliche Nachteile dar.
- Grobtaktung: Bei der Grobtaktung arbeitet die VPLC einen PLC-Zyklus ab und friert sich danach ein. Aus der Zeitdauer für diesen PLC-Zyklus wird anhand der Zykluszeit des Interpolators die Anzahl der Interpolatortakte berechnet, die

während des PLC-Zyklus abgearbeitet worden wären. Für diese Anzahl an Interpolatortakten wird daraufhin der VNCK gestartet. Der Datenaustausch zwischen VNCK und VPLC würde jeweils nur nach einem PLC-Zyklus erfolgen. Vorteile der Grobtaktung sind ihre Schnelligkeit, da weniger Datentransfer stattfindet, und der geringere Implementierungsaufwand. Von Nachteil ist, dass es keine realistische Reaktion auf alarmgesteuerte Funktionen gibt.

Die Feintaktung ist wegen der besseren Abbildung des echten Kommunikationsverhaltens vorzuziehen. Da im Mittelpunkt dieser Arbeit die Auslegung von Vorschubantrieben im Hinblick auf die Bahngenauigkeit am TCP steht, worauf die PLC keinen direkten Einfluss hat, wurde die Einbindung der PLC in die Simulationsumgebung nicht weiter betrachtet.

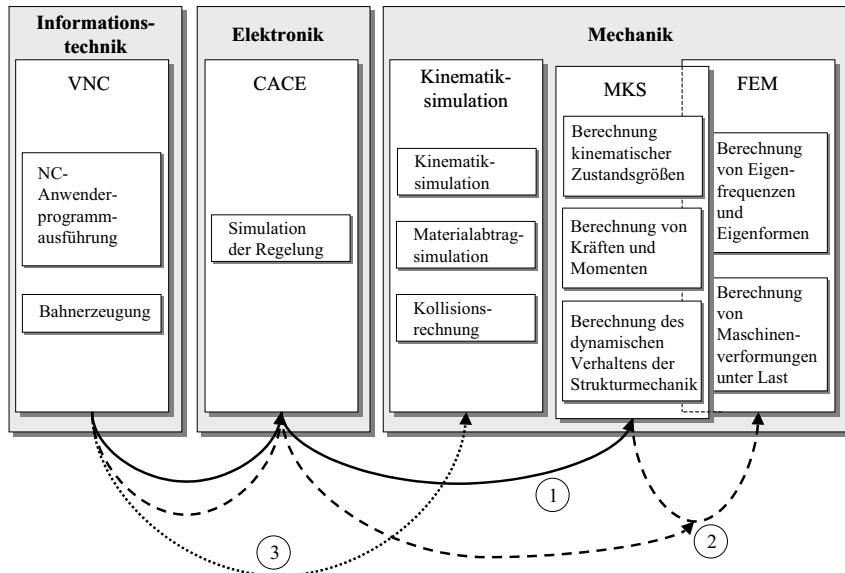
Abschließend sei noch auf die Modellbildung der Schnittstellen der Mechatronik-Simulationsbausteine Servomotor, Antrieb und VNCK eingegangen. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei diesen Mechatronik-Simulationsbausteinen um kommerzielle Komponenten. Im Gegensatz zu den mechanischen Komponenten, bei denen die Schnittstellen immer wieder an verschiedenen Stellen zu liegen kommen können, weshalb Regeln für die durchgängige Modellierung in unterschiedlichen Sichten erarbeitet werden mussten, liegen die Schnittstellen hier fest. Aus Tabelle 8-4 werden die Schnittstellen ersichtlich. Diese müssen bei der Modellbildung der zugehörigen Sicht der Mechatronik-Simulationsbausteine berücksichtigt werden.

Mechatronik-Simulationsbaustein	Schnittstellen	
	Input	Output
VNCK	NC-Programm	Lagesollwerte für die zugehörigen NC-Achsen
Antrieb	<ul style="list-style-type: none">• Lagesollwert• Lageistwert• Motoristdrehzahl	Spannungssollwert
Servomotor	<ul style="list-style-type: none">• Spannungssollwert• Motoristdrehzahl	Motormoment

Tabelle 8-4: Übersicht über die Schnittstellen der Mechatronik-Simulationsbausteine VNCK, Antrieb und Servomotor

8.1.10 Konfiguration mechatronischer Gesamtmodelle

In den vorausgegangenen Kapiteln wurden ausführlich alle Mechatronik-Simulationsbausteine beschrieben, die für die Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen erforderlich sind. Des Weiteren wurden bereits Verknüpfungen der Mechatronik-Simulationsbausteine zu simulationsmethodenspezifischen Modellen vorgestellt. Jedes simulationsmethodenspezifische Modell für sich allein betrachtet ist bereits in der Lage, Informationen zu liefern, die einem Entwicklungingenieur normalerweise erst am realen Produkt zugänglich sind. Die vollständig virtuelle und mechatronische Entwicklung von Werkzeugmaschinen macht es jedoch erforderlich, die einzelnen Modelle untereinander zu kombinieren.



①, ②, ③: Beispiele für mechatronische Gesamtmodelle zur Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen

Abbildung 8-16: Applikationsebene der Simulationsumgebung: Simulationsmethodenspezifische Modelle und Beispiele für deren Verknüpfung zu mechatronischen Gesamtmodellen

Abbildung 8-16 gibt einen Überblick über die Analysemöglichkeiten der Simulationsumgebung und die zugehörigen mechatronischen Gesamtmodelle. Im Folgenden sollen hieraus zwei Modelle genauer vorgestellt werden, die für die Auslegung der

Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen von besonderer Bedeutung sind: Ein Modell zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Antriebsmechanik, Regelung und Bahnerzeugung und ein Modell zum Test von NC-Programmen.

8.1.10.1 Mechatronische Gesamtmodelle zur Untersuchung der Bewegungsdynamik

Ein Teilziel jeder Werkzeugmaschinenentwicklung besteht meist darin, die Produktivität und damit die bestehende Dynamik weiter zu steigern. Dies geschieht durch immer stärkere Ausnutzung des von der NC-Steuerung zur Verfügung gestellten Funktionsumfangs, durch Optimierung der Regelung und durch Leichtbaukonstruktionen in der Mechanik (*Tönshoff u. a. 1998; Heisel & Ziegler 2000*). Diese Optimierungsmaßnahmen in ihrer Gesamtheit führen dazu, dass die Maschinen immer häufiger in ihren Grenzdynamicbereich gelangen. Um das dynamische Verhalten der Maschine in den Grenzbereichen gezielt untersuchen zu können, ist ein Modell erforderlich, das die Bereiche Bahnerzeugung, Regelung und Mechanik detailliert abbildet. Der hierzu geeignete Simulationsverbund ist in Abbildung 8-16 mit den Nummern 1 und 2 gekennzeichnet. Zur Erzeugung realer Lagesollwerte wird der VNCK benötigt. Um den Einfluss der Regelung berücksichtigen zu können, wird das elektrische Antriebsmodell angekoppelt und letztendlich wird ein Modell der Mechanik benötigt. Für prinzipielle Untersuchungen, z. B. um Lagerungen, Führungssysteme und Getriebestufen auszulegen, ist es zulässig, die Mechanik als Starrkörpersystem zu betrachten (Abbildung 8-16, Nummer 1). Hat das elastische Verhalten der Gestellkomponenten bedeutenden Einfluss, muss die Mechanik als flexibles Mehrkörpermodell in das Gesamtmodell integriert werden (Abbildung 8-16, Nummer 2). Da hybride Mehrkörpermodelle auf Grund der flexiblen Körper über eine große Anzahl an Freiheitsgraden verfügen, worunter die Rechenperformance deutlich leidet, werden mit Hilfe flexibler Mehrkörpermodelle in der Regel nur die wirklich kritischen Bewegungskonstellationen untersucht. Diese sind den Ingenieuren auf Grund ihres Erfahrungsschatzes bekannt.

Betrachtet man den Informationsfluss dieses Simulationsmodellverbundes während einer Simulation, so generiert die VNCK zyklisch Lagesollwerte und übergibt diese an das Antriebsmodell. Das Antriebsmodell berechnet daraus einen Drehmomentsollwert als Führungsgröße für die Mechanik. Das Modell der Mechanik schließt den Regelungskreislauf, indem es die zugehörige Schlittenistposition sowie die Servomotorrotoristdrehzahl berechnet und diese Größen an das Antriebsmodell zurückgibt.

8.1.10.2 Mechatronisches Gesamtmodell zum Test von NC-Programmen

Die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit durch ein verbessertes dynamisches Maschinenverhalten ist ein Beitrag zur Produktivitätssteigerung einer Werkzeugmaschine. In der Produktion kann die Produktivität weiterhin durch die Optimierung der NC-Programme gesteigert werden. Optimierungspotenzial bieten das Ablösen rein sequenzieller Bearbeitungsprozesse durch die Parallelisierung von Bearbeitungsprozessen und die Reduzierung der Nebenzeiten durch das Ausreizen der steuerungstechnischen Funktionalitäten wie z. B. Eilgangbewegungen mit programmiertem Überschleifabstand. All diese Maßnahmen vergrößern das Kollisionsrisiko numerisch gesteuerter NC-Achsen. Abhilfe schafft der Test von NC-Programmen mittels Simulation.

Eine hierfür geeignete Simulationsumgebung ist in Abbildung 8-16 mit der Nummer 3 markiert. Um aus der Simulation des original NC-Programms möglichst realistische Simulationsergebnisse (z. B. Bearbeitungszeit) zu erhalten, wird zur Erzeugung der Bewegungsbahn wiederum der VNCK in das Simulationsmodell eingebunden. An diesen wird direkt das Kinematikmodell angekoppelt, um eine gute Animationsperformance sicherzustellen. Diese würde leiden, wenn man das physikalische Verhalten der Regelung und der Mechanik berücksichtigen wollte, was durchaus auch möglich ist. Die Optimierung der NC-Programme geschieht mit Hilfe dieses Simulationsmodells weitgehend grafisch interaktiv. Der NC-Programmierer erstellt ein NC-Programm. Mit Hilfe des 3D-Arbeitsraummodells und der Kollisionsrechnung können nach jeder Lageänderung der Maschinenkomponenten automatisch Kollisionen erkannt und diese dem Anwender direkt grafisch und textuell angezeigt werden. Damit hat der Anwender die Möglichkeit, die geometrische Verträglichkeit der Komponenten im Arbeitsraummodell zu verifizieren. Der Bearbeitungsfortschritt am Werkstück wird mit Hilfe der Materialabtragsimulation erkennbar. Wird ein Fehler erkannt, erfolgt die Änderung des NC-Programms und eine erneute Simulation. Da die Fehlererkennung direkt anhand der Animation erfolgt, werden hohe Anforderungen an die Qualität der Simulationsergebnisse und die Geschwindigkeit der Animation gestellt.

8.2 Die IT-Infrastruktur

Die Modelle der Applikationsebene der Simulationsumgebung basieren in der hier vorgestellten Ausbaustufe auf dem VNCK, einer CACE-Software, einem Mehrkörper-, einem Finite-Elemente-Methode- und einem Kinematiksimulationsprogramm. Zum Zweck der mechatronischen Auslegung müssen die darin modellierten Teilsysteme miteinander gekoppelt werden können (siehe Kapitel 8.1.10). Eine Aufgabe der IT-Infrastruktur ist es, die hierfür erforderliche Kommunikation der Werkzeuge zu ermöglichen. Die Realisierung der Kommunikation zwischen den Werkzeugen wird zunächst in Kapitel 8.2.1 vorgestellt. Eine weitere wichtige Aufgabe der IT-Infrastruktur

struktur ist die Anbindung der Programme an die Datenbasis. Diese wird daran anschließend in Kapitel 8.2.2 ausführlich behandelt.

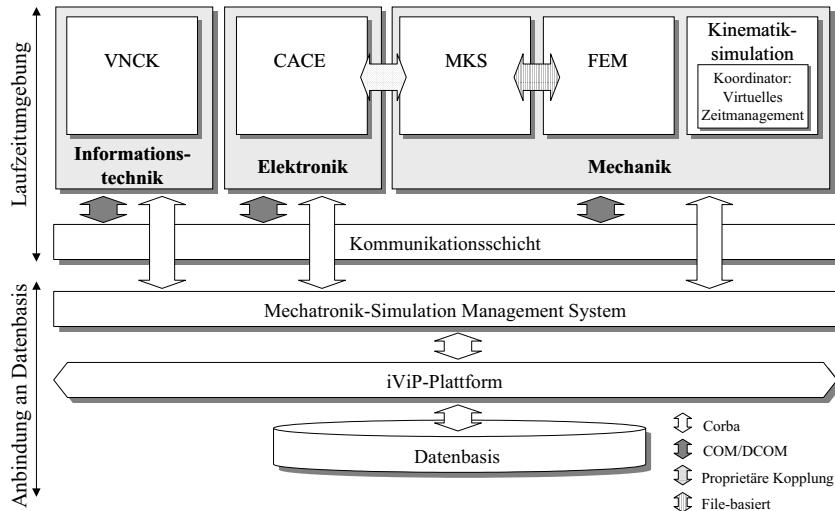


Abbildung 8-17: Die Architektur der IT-Infrastruktur der Simulationsumgebung

8.2.1 Die Laufzeitumgebung

Die Laufzeitumgebung übernimmt die Ausführung des erstellten Modells und den Datenaustausch zwischen den Programmen. Die Systemarchitektur zur Berechnungs-laufzeit wird anhand des "Mechatronischen Gesamtmodells zur Untersuchung der Bewegungsdynamik" (Kapitel 8.1.10.1) vorgestellt, da dieses Gesamtmodell den größten Simulationsprogrammverbund im Rahmen der Simulationsumgebung erfordert. Alle anderen Laufzeitumgebungen lassen sich, z. B. durch Abkapselung nicht benötigter Komponenten, daraus ableiten.

8.2.1.1 Das Zeitmanagement

In der hier betrachteten Ausbaustufe des mechatronischen Gesamtmodells tauschen zur Laufzeit die Kinematisations-, die CACE-, die MKS- und der VNCK zyklisch Daten aus. Die Integration des VNCK in die Simulationsumgebung erfordert

die Synchronisation aller an der Simulation beteiligten Modelle. Das der Synchronisation zu Grunde liegende Zeitmanagement verdeutlicht Abbildung 8-18.

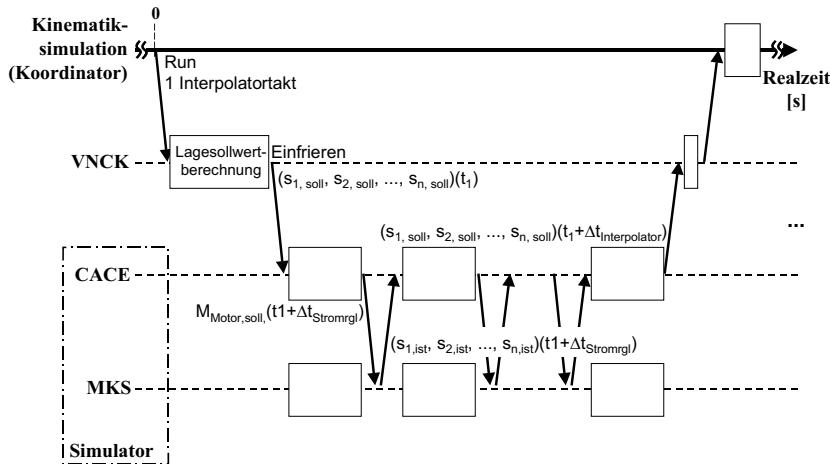


Abbildung 8-18: Das Zeitmanagement der Laufzeitumgebung: Synchronisation der Einzelkomponenten der Simulationsumgebung

Im Rahmen seiner Funktion als Werkzeug zur Maschinensimulation stellt die Kinematiksimulation standardmäßig Funktionalitäten wie 3D-Visualisierung von Bewegungsabläufen, Kollisionskontrolle, NC-Simulation (auf Basis eines nachgebildeten NCK) und automatische Aktualisierung der Werkstückgeometrie während einer Bearbeitungssimulation zur Verfügung. Um diese umfangreichen Basisfunktionalitäten nutzen zu können, wurde die Kinematiksimulation als Basiswerkzeug für die Laufzeitumgebung ausgewählt. Die übrigen Simulationswerkzeuge sind der Kinematiksimulation untergeordnet. Im Gesamtkonzept der virtuellen Werkzeugmaschine zur Simulation der NC-gesteuerten Bewegungsdynamik übernimmt damit die Kinematiksimulation die Aufgabe der Synchronisation der einzelnen Simulationswerkzeuge der integrierten Simulationsumgebung während des Simulationslaufs (Abbildung 8-18). Die hierarchische Struktur ermöglicht eine einfache Anpassung der Simulationsumgebung an den geforderten Detaillierungsgrad. So kann z. B. zum Test von NC-Programmen, wofür eine gute Animationsperformance erforderlich ist, das dynamische Mechanikmodell abgekoppelt werden. Stattdessen kann ein in der Kinematiksimulationssoftware implementiertes 3D-Kinematikmodell für die Simulation genutzt werden. Im Folgenden wird ein Berechnungslauf der in Abbildung 8-18 veranschaulichten Ausbaustufe des mechatronischen Gesamtmodells genauer erklärt.

In der Funktion als Koordinator löst die Kinematiksimulation bei der VNCK die Berechnung von n Interpolatortakten aus. Hierauf berechnet der VNCK für diese Zeitscheibe Lagesollwerte und übergibt diese chronologisch, einschließlich eines Zeitstempels, zur weiteren Berechnung der zugehörigen Lageistwerte an das geregelte Modell der Mechanik (im Folgenden "Simulator" genannt). Für den Fall, dass sich die vom Koordinator vorgegebene Zeitscheibe über mehrere Interpolatortakte erstreckt, werden die Lagesollwerte des VNCKs vom Simulator zuerst gesammelt und dann geschlossen abgearbeitet. Während der Berechnung des Simulators friert sich der VNCK ein und wartet, bis die zum Endzeitpunkt dieser Zeitscheibe zugehörigen Lageistwerte berechnet sind. Der Simulator liefert die Lageistwerte an den VNCK zurück und der VNCK seinerseits reicht die Lageistwerte an die Kinematiksimulation weiter, von der die exakte Bewegung visualisiert wird.

8.2.1.2 Die Kommunikation zwischen VNCK und Simulator

Für die Kommunikation zwischen Kinematiksimulation und VNCK sowie zwischen VNCK und Simulator sind verschiedene Kommunikationsmechanismen denkbar. Die Alternativen werden an der Kommunikation zwischen VNCK und Simulator aufgezeigt, da hier in dem Fall, dass mehrere Interpolatortakte auf einmal abgearbeitet werden sollen, sehr viel Kommunikation stattfindet. Die Kommunikation zwischen VNCK und Simulator läuft nach dem Client-Server-Prinzip ab, so dass gemäß dem oben beschriebenen Ablauf der VNCK die Aufgabe des Clients und der Simulator die Aufgabe des Servers übernimmt. Die zwischen Client und Server stattfindende Kommunikation kann dabei synchron oder asynchron erfolgen (Abbildung 8-19).

Im Fall der synchronen Kommunikation greift der Client-Prozess auf eine Methode des Simulators zu. Der Client fällt von diesem Zeitpunkt in einen inaktiven Zustand, bis der dadurch am Server ausgelöste Prozess abgeschlossen ist. Erst dann bekommt der Client Rückmeldung und wird wieder aktiviert. Im Gegensatz dazu ruft der Client bei der asynchronen Kommunikation beim Server eine Methode auf. Der Server bestätigt, dass er den Auftrag entgegengenommen hat, der Client kann daraufhin weiterarbeiten. Wenn der Server die Berechnungen abgeschlossen hat, tritt er durch Absetzen eines Events wieder mit dem Client in Kontakt. Die asynchrone Kommunikation hat damit gegenüber der synchronen den Vorteil, dass Client und Server unabhängig voneinander arbeiten können. Aus diesem Grund wurde die Kommunikation zwischen VNCK und Server asynchron implementiert, da so der Rechner, auf dem der VNCK läuft, während der rechenzeitverschlingenden Berechnungen des Simulators für andere Aufgaben Rechenleistung zur Verfügung stellen kann. Die Kommunikation zwischen Kinematiksimulation und VNCK wurde ebenfalls asynchron implementiert.

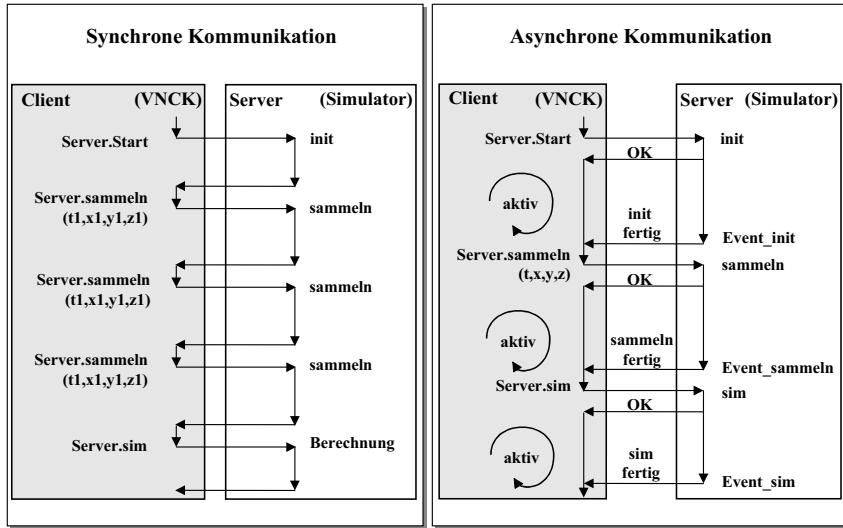


Abbildung 8-19: Synchrone vs. asynchrone Kommunikation

8.2.1.3 Die Kommunikation zwischen MKS- und CACE-Software

Führt man sich nochmals den Signalfluss innerhalb eines Vorschubantriebs vor Augen (Abbildung 8-3), so fällt auf, dass es sich bei der bisher betrachteten Schnittstelle zwischen VNCK und geregeltem Mechanikmodell um eine unidirektionale Schnittstelle handelt (Lagesollwerte an Antriebe). Im Gegensatz dazu zeichnet sich die Schnittstelle zwischen dem Modell der Antriebe und dem Modell der Mechanik durch einen bidirektionalen Datenfluss aus; das Antriebsmodell schickt Daten an das Modell der Mechanik, erhält aber umgekehrt für den nächsten Berechnungsschritt Daten vom Mechanikmodell zurück. Die Berechnung des Antriebsmodells und des Mechanikmodells müssen also parallel erfolgen.

Diese Art der Berechnung bezeichnet man als Co-Simulation. Systemtechnisch ist das Mechanikmodell ein Block im Blockdiagramm des Regelungsmodells, der zeitdiskret mit dem Regelungsmodell die erforderlichen Daten austauscht. Die Berechnung des Mechanikmodells erfolgt weiterhin zeitkontinuierlich in der MKS-Software. Dabei muss Folgendes berücksichtigt werden:

- Die Berechnungsintervalle der MKS-Software müssen kleiner oder gleich der Berechnungsintervalle der CACE-Software sein, damit zum Zeitpunkt der Synchronisation von der CACE- mit der MKS-Software auch Daten von der MKS-Software zur Verfügung stehen.

- Für beide Modelle stellt die Berechnung eines Zeitinkrementes eine abgeschlossene Berechnung dar. Daher müssen zu Beginn einer jeden Rechnung die Endzustände der vorherigen Rechnung auf die Anfangszustände des neuen Berechnungsschritts kopiert werden.

8.2.1.4 Die Middleware der Laufzeitumgebung

Aufgabe der Middleware ist die Realisierung dieser Kommunikationsmechanismen. Wie in Kapitel 7.3 beschrieben, wurde für die Laufzeitumgebung COM/DCOM als primärer Kommunikationsmechanismus ausgewählt, da COM/DCOM auf Grund seines geringen Daten- und Adressierungsaufwands sehr schnell ist. Dies hat Vorteile in Bezug auf die Kommunikation mit dem VNCK.

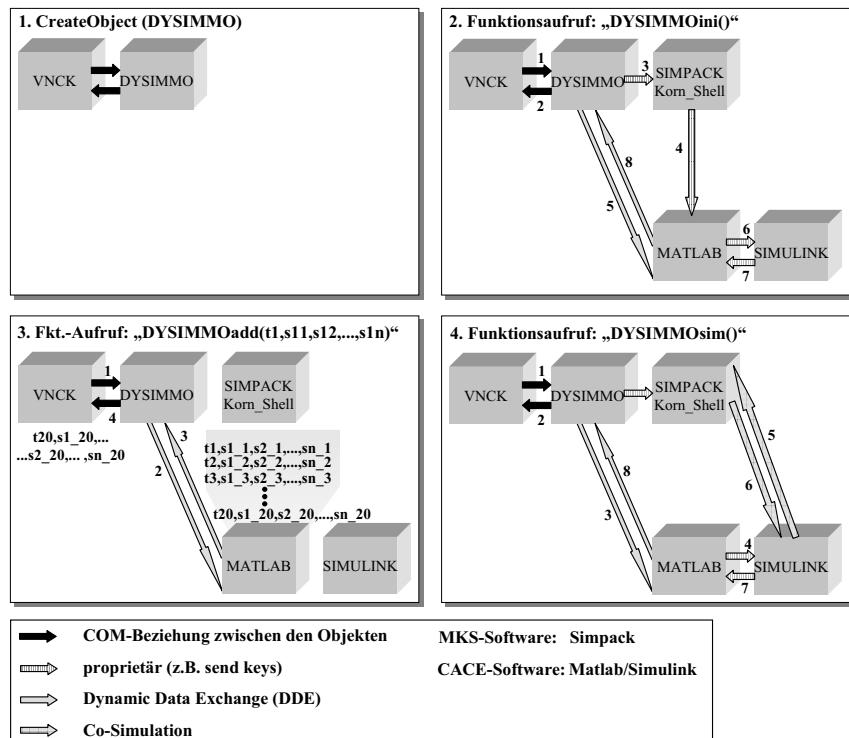


Abbildung 8-20: Architektur der Middleware der Laufzeitumgebung

Die Kinematiksimulations- und die CACE-Software unterstützen COM/DCOM. Wie jedoch aus Abbildung 8-17 (obere Bildhälfte) hervorgeht, verfügen das MKS- und das FEM-Programm nicht über die spezifizierte COM/DCOM-Schnittstelle. Das FEM-Programm kann diesbezüglich außer Acht gelassen werden, da es sich bei der MKS-FEM-Schnittstelle um einen einmaligen, File-basierten Datenaustausch handelt und somit zur Berechnungslaufzeit kein dynamischer Datenaustausch stattfindet. Für die Anbindung des Simulators an den VNCK musste jedoch ein spezieller Kommunikationsmechanismus entworfen werden (Abbildung 8-20).

Kern der Architektur der Anbindung des Simulators an den VNCK ist das COM-Objekt DySimMo (Dynamic Simulation Modul). DySimMo bildet eine Hülle um die CACE- und die MKS-Software, so dass die gesamte Kommunikation zwischen der VNCK und dem Programmverbund aus CACE- und MKS-Software nur noch über die eine COM-Schnittstelle erfolgt. Damit werden zur Laufzeit folgende Schritte durchlaufen: Mit dem Berechnungsstart des Koordinators erzeugt der VNCK das DySimMo Objekt und startet dessen Initialisierungsmethode. Daraufhin fährt das DySimMo Objekt die Simulationsumgebung hoch und stellt eine DDE-Verbindung zwischen DySimMo und der CACE-Software her. Dynamic Data Exchange (DDE) ist ein weiteres Protokoll, das die Kommunikation zwischen zwei Programmen ermöglicht (*Microsoft 2002*). Das Microsoft Windows spezifische DDE-Protokoll wurde an dieser Stelle gewählt, da die von der CACE-Software angesprochenen Funktionen nur über eine DDE-Schnittstelle verfügen. Ist die Initialisierungsphase abgeschlossen, kann der VNCK mit der Interpolation beginnen. Jeder einzelne Lagesollwert wird zunächst von der CACE-Software gesammelt. Durch Aufruf der Funktion DYSIMMOSim() werden von der CACE- und der MKS-Software auf Basis von Co-Simulation die zugehörigen Lageistwerte berechnet.

Neben den Kommunikationsmechanismen zur Berechnungslaufzeit erfordert die Simulationsumgebung eine Softwarearchitektur, welche die der Simulation vor- und nachgelagerten Phasen, die Modellbildung und die Dokumentation, unterstützt. Die hierfür erforderliche IT-Infrastruktur wird im folgenden Kapitel behandelt.

8.2.2 Die IT-Infrastruktur zur Unterstützung des verteilten, mechatronischen Entwicklungsprozesses

Die wesentliche Voraussetzung für die mechatronische Produktentwicklung ist die intensive Zusammenarbeit der verschiedenen Abteilungen während aller Phasen der Produktentwicklung. Eine Voraussetzung hierfür ist die informationstechnische Vernetzung aller Beteiligten.

Die Integration der Entwicklungsbereiche im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung ist eine Hauptaufgabenstellung, der sich das vom BMBF geförderte Projekt "integrierte Virtuelle Produktentstehung (iViP)" (*Krause u. a. 2001*) angenommen hat. Dieses Projekt verfolgte das Ziel, aufbauend auf international

standardisierten oder sich in Entwicklung befindenden Schnittstellen, eine IT-Plattform für die Integration heterogener Produktentstehungsprozesse zu schaffen. Da im Rahmen dieser Arbeit an dem iViP-Projekt mitgearbeitet wurde, wird die von iViP entwickelte Infrastruktur für die Arbeit genutzt.

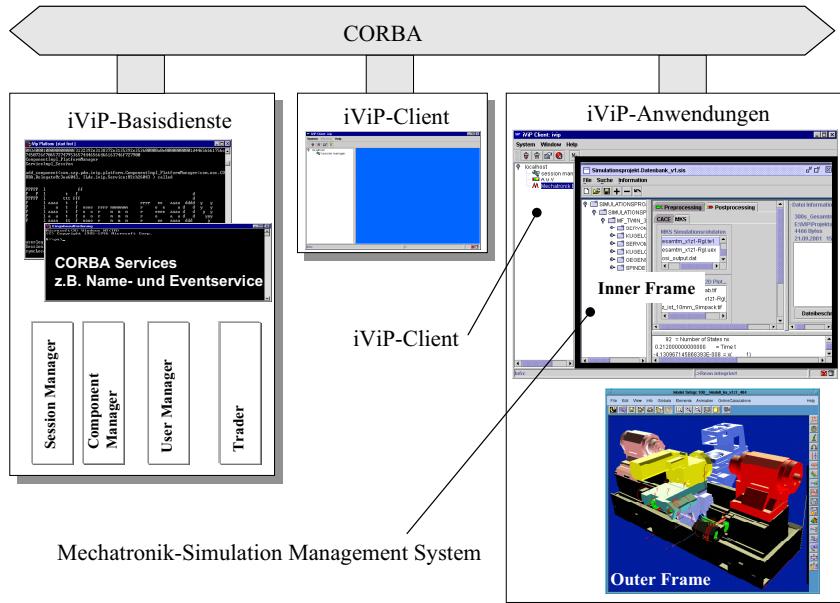


Abbildung 8-21: Integration der iViP-Plattform in die Simulationsumgebung: Mechatronik-Simulation Management Systems als iViP-Client inner Frame Anwendung

Kern der auf einer Client-Server-Architektur basierenden Systemarchitektur ist die so genannte iViP-Integrationsplattform. Die iViP-Integrationsplattform stellt ein Netzwerk zur Verfügung, in das iViP-konforme Softwaremodule integriert werden können. Basiskomponenten der iViP-Integrationsplattform sind die CORBA-basierte iViP-Objektschnittstelle sowie die Systemdienste Component Manager, Session Manager, User Manager und Trader. Der Component Manager überwacht die Werkzeuge, die sich an der Plattform an- und abmelden. Der Session Manager verwaltet die Informationen einer Benutzersitzung in Bezug auf die Berechtigungen des aktuellen Nutzers, während der User Manager die Berechtigungen des Nutzers in Bezug auf die Objekte kontrolliert. Über den Trader ist es möglich, Software zu nutzen, die nicht auf dem lokalen Server installiert ist. Als einheitliche, plattformübergreifende Benutzerschnittstelle zu den iViP-konformen Werkzeugen wurde der so genannte iViP-Client

geschaffen. Der iViP-Client ermöglicht über iViP-Beans den Zugriff auf alle in die iViP-Plattform integrierten Anwendungen. Die iViP-Beans sind in Java implementiert und müssen bestimmte Schnittstellen zur Verfügung stellen. Größere kommerzielle Softwarewerkzeuge, bei denen es z. B. auf Grund des Aufbaus ihrer Benutzerschnittstelle keinen Sinn macht, diese direkt in den iViP-Client zu integrieren oder die sich nicht integrieren lassen, können dennoch über den iViP-Client gestartet werden. Sie laufen dann als iViP-Client "Outer-Frame" Anwendungen außerhalb der Oberfläche des iViP-Clients in ihrer gewohnten Umgebung. Diese Funktionalitäten können in idealer Weise genutzt werden, um das verteilte Arbeiten in der Simulationsumgebung zu nutzen. Wie in Abbildung 8-21 dargestellt, wurde die Simulationsumgebung in die iViP-Architektur integriert. So wurde das MS^2 als Plug-In für den iViP-Client implementiert. Auf Grund dessen kann an jedem beliebigen Arbeitsplatz auf das MS^2 zugegriffen und damit gearbeitet werden (Reinhart u. a. 2002).

Damit wurde auch der systemtechnische Unterbau der Simulationsumgebung ausführlich dargestellt, so dass abschließend nun mehr die Realisierung der Datenebene offen bleibt. Diese umfasst das Mechatronik-Simulation Management System und dessen Anbindung an ein PDM-System und eine Datenbasis.

8.3 Das Mechatronik-Simulation Management System und die Anbindung an die Datenebene

Die richtige Information zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung zu haben, ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für die neue Methode. Dies erfordert eine Instanz, die die Arbeiten der verschiedenen Abteilungen koordiniert und Transparenz schafft. Dies ist Aufgabe des Mechatronik-Simulation Management Systems.

8.3.1 Realisierung des Mechatronik-Simulation Management Systems

Wie im zugehörigen Konzeptionskapitel (Kapitel 6.1) hergeleitet, wurde für das MS^2 ein zweigeteilter Aufbau gewählt. Das MS^2 setzt sich aus dem Bibliotheksmodul als Werkzeug zur Unterstützung des Aufbaus der Mechatronik-Simulationsbausteine und dem Simulationsprojektmodul als Werkzeug zur Unterstützung der Arbeit mit den Mechatronik-Simulationsbausteinen zusammen. Die folgenden beiden Kapitel beschreiben den hierfür gewählten Aufbau der Benutzerschnittstelle der beiden Module.

8.3.1.1 Aufbau und Funktionsweise des Bibliotheksmoduls

Die Benutzerschnittstelle des Bibliotheksmoduls ist in drei Bereiche unterteilt, den Mechatronik-Simulationsbaustein Explorer, einen zweiten Bereich, in dem die simulationsmethodenspezifische Präsentation der vorhandenen Daten erfolgt, und ein Multi-View-Window (Abbildung 8-22).

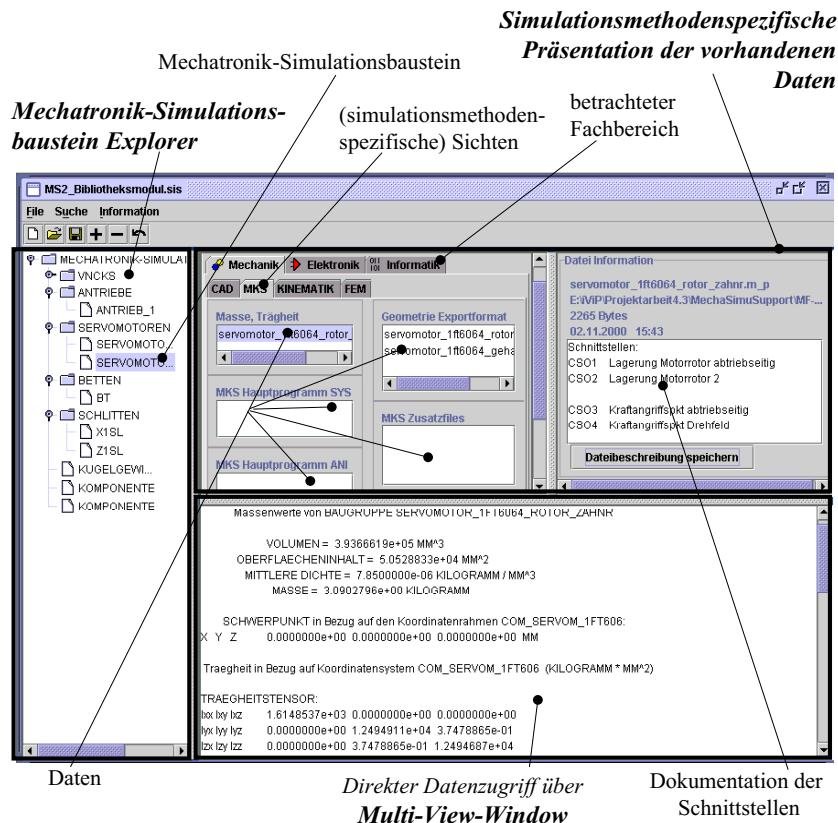


Abbildung 8-22: Aufbau des Bibliotheksmoduls des Mechatronik-Simulation Management Systems

Aufgabe des Mechatronik-Simulationsbaustein Explorers ist die übersichtliche Verwaltung der existierenden Mechatronik-Simulationsbausteine. Die Bausteine

können im Mechatronik-Simulationsbaustein Explorer zu beliebigen Gruppen zusammengefasst werden.

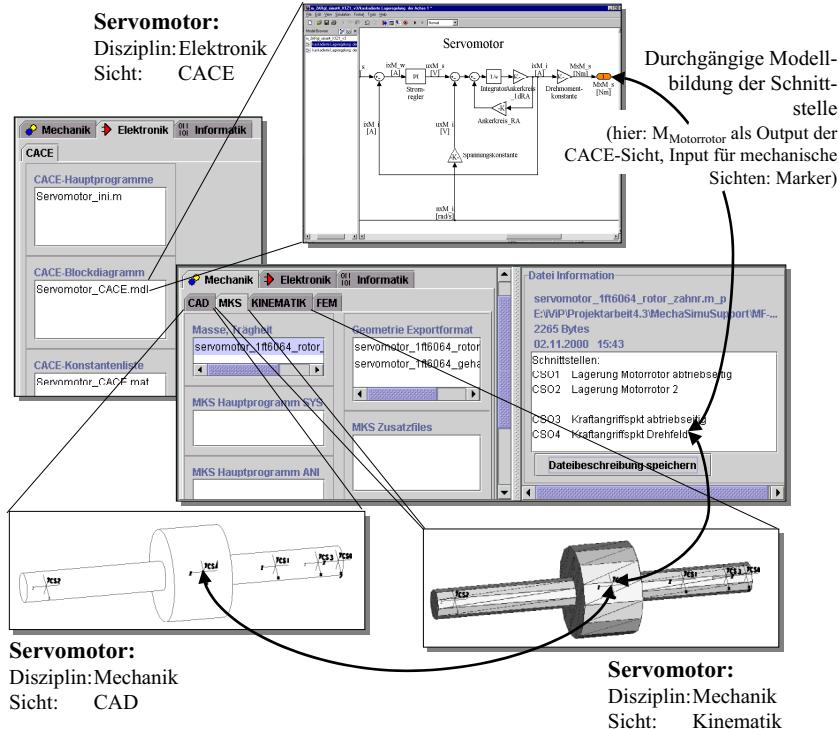


Abbildung 8-23: **MS²-Bibliotheksmodul:** Ausschnitt aus der aufgabenbezogenen Präsentation der von einem Mechatronik-Simulationsbaustein verfügbaren Daten

Die Hauptaufgabe des Bibliotheksmoduls besteht in der simulationsmethoden-spezifischen Zusammenstellung der einen Mechatronik-Simulationsbaustein beschreibenden Daten. Hierzu dient der mit "simulationsmethodenspezifische Präsentation der vorhandenen Daten" bezeichnete Bereich der Benutzeroberfläche. Die Sortierung erfolgt zunächst über die Auswahl der fachbereichspezifischen Sicht. Ausgehend davon werden die Daten den Simulationswerkzeugen zugeordnet, die die Daten weiterverarbeiten können. Weiterhin ist in Abbildung 8-23 die durchgängige Modellbildung und Dokumentation der Schnittstellen zu erkennen. Exemplarisch hervorgehoben wurde die Schnittstelle zwischen CACE-Modell des Servomotors und den mechanischen Sichten. So ist auf dem Rotor des Servomotors im CAD- bzw. im

MKS-/Kinematikmodell der Marker zu erkennen, an dessen Stelle ein von der CACE-Software berechnetes Antriebsmoment in das MKS-Modell eingeleitet werden kann (Verknüpfung zwischen mechanischer und elektronischer Sicht). Und weiterhin wird ersichtlich, dass das MKS- und das Kinematikmodell dieselbe geometrische Repräsentation verwenden. Das Multi-View-Window dient schließlich dem direkten Zugriff auf den Inhalt der verwalteten Dateien.

8.3.1.2 Aufbau und Funktionsweise des Simulationsprojektmoduls

Aufgabe des MS²-Simulationsprojektmoduls ist die Dokumentation der mechatronischen Modellbildung.

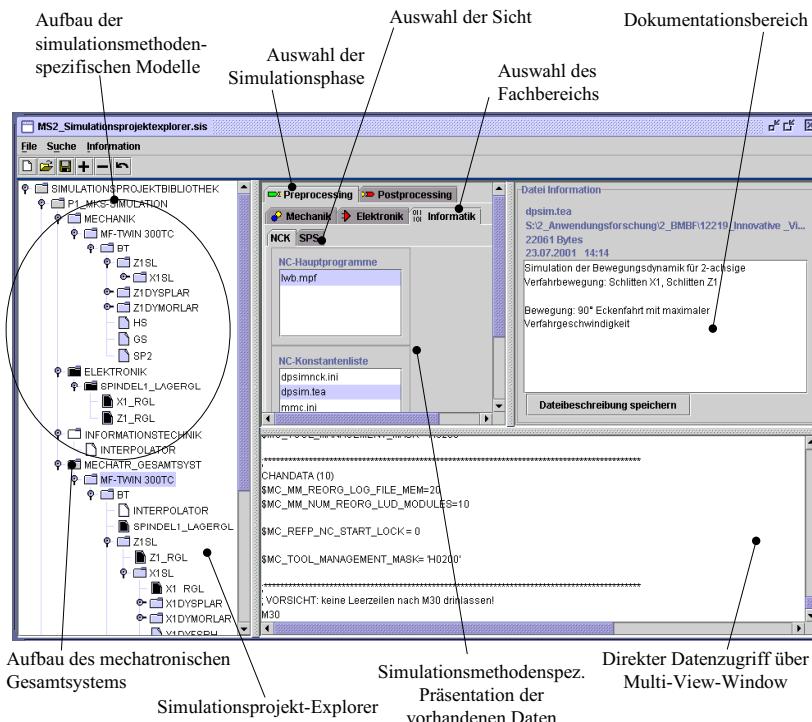


Abbildung 8-24: Aufbau des Simulationsprojektmoduls des Mechatronik-Simulation Management Systems

Die Topologie der simulationsmethodenspezifischen Modelle sowie der daraus zusammengesetzten mechatronischen Gesamtmodelle wird, wie in Kapitel 6.4 vorgestellt, im Simulationsprojektmodul in Form einer Baumstruktur beschrieben. Die einzelnen Knoten des Baums entsprechen den gewählten Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine. Der mechatronische Zusammenhang wird sichtbar, indem jeder Fachbereich eine eigene Farbcodierung trägt (Abbildung 8-24). Der Aufbau der Baumstruktur erfolgt per Drag & Drop, wodurch die Mechatronik-Simulationsbausteine aus dem Bibliotheksmodul des **MS²** in das Simulationsprojektmodul übernommen werden können.

Eine weitere wichtige Aufgabe des Simulationsprojektmoduls neben der Dokumentation des Modellaufbaus (Model-Preprocessing) ist die Verwaltung und Dokumentation der zu dieser speziellen Konfiguration des mechatronischen Gesamtsystems berechneten Simulationsergebnisse. Hierzu wurde im Simulationsprojektmodul eine weitere Strukturierungsebene, die Auswahl der Simulationsphase, eingeführt. Die mit Hilfe einer speziellen Modellkonfiguration erzielten Simulationsergebnisse werden auf dieser Ebene (Model-Postprocessing) mit dem Modellaufbau abgelegt.

Zusammenfassend bringt das **MS²** folgende Vorteile mit sich:

- Die Anwendung des **MS²** unterstützt die durchgängige Modellbildung und trägt damit wesentlich zur Vermeidung redundanter Daten bei.
- Durch die konsequente Anwendung des **MS²** während der Durchführung von Simulationsprojekten wird der Simulationsfortschritt automatisch kontinuierlich dokumentiert.
- Zu jedem Zeitpunkt stehen Simulationsergebnis und zugehöriges Ausgangsmodell vollständig zur Verfügung.
- Die Trennung von Datenbasis und **MS²** minimiert das anfallende Datenvolumen, da redundante Daten in verschiedenen Modellen nur einmal in der Datenbasis abgelegt werden.
- Über den Aufbau der Benutzeroberfläche und die Anzeige-Funktionalitäten des **MS²** findet eine mechatronikgerechte Aufbereitung der Simulationsprojekte statt, so dass sie auch von Dritten nachvollzogen werden können. Das **MS²** ist ein wesentlicher Baustein zur Unterstützung des verteilten, mechatronischen Entwicklungsprozesses.

8.3.2 Realisierung der Datenebene

Für die eigentliche Datenverwaltung der im Rahmen der mechatronischen Modellbildung anfallenden Daten wird ein kommerzielles PDM-System genutzt.

Integraler Bestandteil der iViP-Integrationsplattform ist eine Schnittstelle zu PDM-Basisdiensten (Mühl & Müller 2002; Adamietz u. a. 2002). Die daran angebundenen iViP PDM-Basisdienste stellen die Funktionalität eines PDM-Systems zur Verfügung. Zum vordefinierten Funktionsumfang der iViP PDM-Basisdienste gehören die klassischen PDM-Funktionalitäten wie eine Versionsverwaltung, ein Prüf- und Freigabewesen sowie Check-in bzw. Check-out Funktionen. Diese Funktionen sind in der PDM-Engine zusammengefasst. Des Weiteren sind in den PDM-Basisdiensten Werkzeuge implementiert, mit denen die vordefinierten Objekte des iViP PDM-Systems angepasst bzw. erweitert werden können (Definition Toolset Engine) (Abbildung 8-25). Diese iViP PDM-Basisdienste werden bezüglich der Datenverwaltung von der Simulationsumgebung genutzt (vgl. Abbildung 7-3).

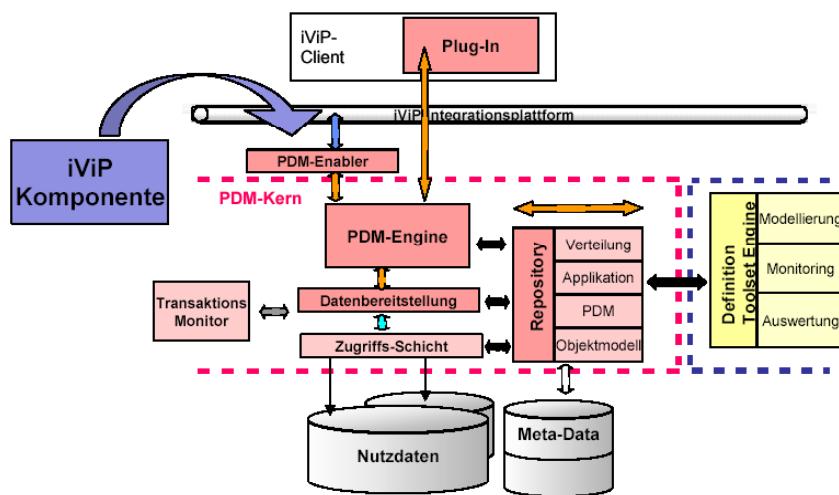


Abbildung 8-25: Architektur der iViP PDM-Basisdienste (Quelle: Pasewaldt 2001, S. 3-10)

9 Anwendungsbeispiel "Entwicklung eines Dreh-Fräsbearbeitungszentrums"

Nach der Ausarbeitung der Vorgehensweise sowie der Entwicklung unterstützender Methoden und Werkzeuge wird die Anwendung der Simulationsumgebung an der Durchführung eines realen Entwicklungsprojekts vorgestellt. Ziel des Kapitels ist es, die Praxistauglichkeit der Methode anhand des Anwendungsszenarios unter Beweis zu stellen. Zum Abschluss wird die Vorgehensweise einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen.

9.1 Anwendungsszenario

Als Anwendungsszenario dient die Entwicklung eines Zweispidel-Dreh-Fräsbearbeitungszentrums, das auf höchste Flexibilität und Wirtschaftlichkeit für die Komplexbearbeitung komplexester Werkstücke in mittleren und großen Losgrößen ausgelegt ist.

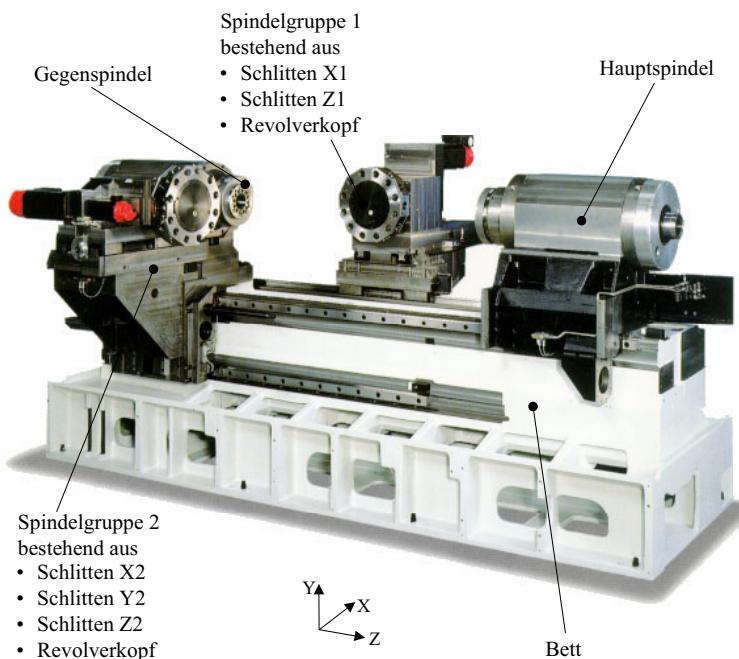


Abbildung 9-1: Drehbearbeitungszentrum (Quelle: Gildemeister Drehmaschinen GmbH)

Dieses neue, innovative Maschinenkonzept, das Dreh- und Fräsbearbeitungen auf einer Maschine ermöglicht, soll durch Weiterentwicklung eines bestehenden Zweiseitig-Drehzentrums (Abbildung 9-1) entstehen. Die Ausgangsmaschine besteht aus zwei koaxial angeordneten Hauptspindeln und zwei Kreuzschlitten mit 12fach Revolvern. Spindelgruppe 2 verfügt zusätzlich über einen Y-Schlitten. Serienmäßig können die beiden Hauptspindeln als C-Achsen betrieben werden. Die Revolver sind mit Werkzeugantrieben ausgestattet. Der Werkstücktransfer von der Haupt- in die Gegenspindel erfolgt durch Verfahren der Gegenspindel.

Durch Austausch des Revolverkopfs in Spindelgruppe 2 durch einen Fräskopf mit B-Achse soll das bestehende Maschinenkonzept in das Dreh-Fräsbearbeitungszentrum umgewandelt werden. Sowohl der Revolverkopf als auch die Frässpindel sollen an der Haupt- und der Gegenspindel eingesetzt werden können. So ist die 4-achsige Drehbearbeitung der Werkstücke an der linken oder der rechten Spindel ebenso möglich wie die 2 x 2-achsige Drehbearbeitung an der Haupt- und der Gegenspindel. Durch die Integration der Frässpindel können die Drehbearbeitungen zudem beliebig mit einer Fräsbearbeitung mit bis zu fünf interpolierenden Achsen kombiniert werden. Somit sind Dreh- und Fräsaufgaben in einem Arbeitszyklus auf einer Maschine möglich. Zusätzlich zu dem Einbau der B-Achse soll die Bewegungsdynamik der Ausgangsmaschine gesteigert werden, da dies heute automatisch von einem Nachfolgemodell erwartet wird.

Da das Dreh-Fräsbearbeitungszentrum unter anderem auf die Massenproduktion zugeschnitten ist, muss folgende Besonderheit dieses Marktsegments berücksichtigt werden. Beim Werkzeugmaschinen für die Massenproduktion kaufen die Kunden nicht mehr das Produkt Werkzeugmaschine. Vielmehr treten die Kunden mit dem Bauteil, das sie fertigen möchten, an den Werkzeugmaschinenhersteller heran. Das Kaufinteresse besteht nun in einer Komplettlösung für die Fertigung des Bauteils, d. h. der Kunde übergibt den Fertigungsprozess in die Verantwortung des Werkzeugmaschinenherstellers. Dabei gilt es zu bedenken, dass die Massenproduktion dadurch gekennzeichnet ist, dass sich die Einsparung jeder Zehntelsekunde Prozesszeit direkt in einer Reduktion der Herstellungskosten bemerkbar macht. Somit hängt die Kaufentscheidung sehr stark von der Bearbeitungszeit ab. Diese muss der Werkzeugmaschinenhersteller folglich bereits in der Angebotsphase vorhersagen und dem Kunden glaubwürdig nachweisen können.

Im Rahmen dieses Entwicklungsprojekts wurde die Simulationsumgebung mit der neuen Vorgehensweise zum Aufbau mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle angewandt. Im Speziellen sollten folgende Aufgabenstellungen frühzeitig und gesichert beantwortet werden können:

- In Bezug auf die Integration der Frässpindel in die bestehende Drehmaschine sollte untersucht werden, welche Auswirkungen die Frässpindel auf das dynamische Verhalten der Strukturmechanik der bestehenden Maschine hat.

- Hinsichtlich der zu steigernden Bewegungsdynamik soll das virtuelle Werkzeugmaschinenmodell dazu herangezogen werden, kritische Belastungskonstellationen aufzuzeigen und Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.
- Wie in der Maschinenbeschreibung dargestellt, erreicht das neue Maschinenkonzept seine Wirtschaftlichkeit insbesondere durch die parallele Dreh- und Fräsbearbeitung an einem oder zwei Werkstücken. Die Folge ist die parallele Bewegung von bis zu neun NC-Achsen in einem relativ kleinen Arbeitsraum. Um das damit verbundene extrem hohe Kollisionsrisiko von Werkzeug, Werkstück und Maschinenkomponenten auf ein Minimum reduzieren zu können, wird für den Test und die Optimierung der NC-Programme ein Simulationsmodell benötigt.
- Nicht zuletzt soll das virtuelle Maschinenmodell in der Angebotsphase zur Abschätzung der Taktzeiten herangezogen werden können.

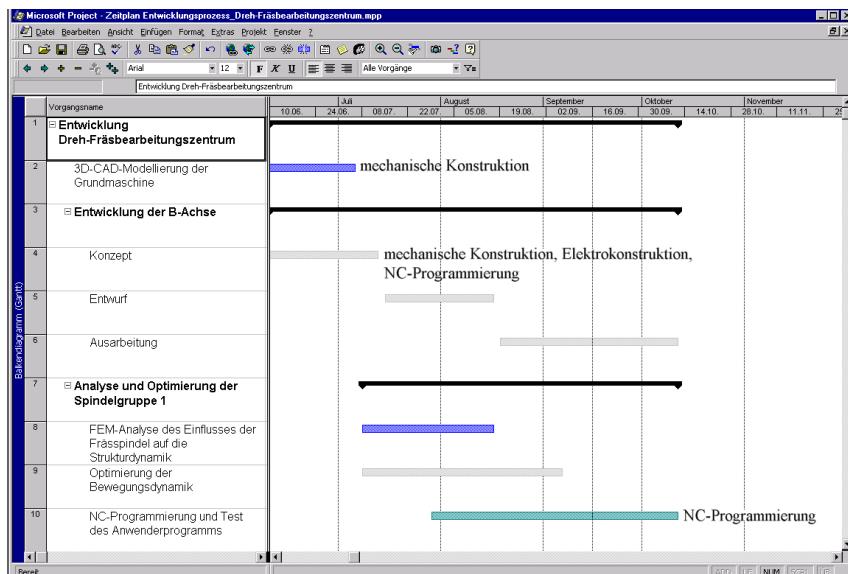


Abbildung 9-2: Zeitplan für die Entwicklung des Dreh-Fräsbearbeitungszentrums

Wie aus Abbildung 9-2 hervorgeht, sollte durch die Parallelisierung der Aufgabenstellungen die Entwicklungszeit verkürzt werden.

9.2 Anwendung der neuen Methode

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellungen wurden folgende Modelle realisiert:

- Zur Untersuchung des Einflusses der Frässpindel auf das dynamische Verhalten der bestehenden Maschinenstruktur wurde die Maschine einer FEM-Berechnung unterzogen.
- Für die NC-Programmierung wurde ein Kinematikmodell der Maschine aufgebaut. Da die steuerungsspezifischen Funktionen großen Einfluss auf die Bahngenaugigkeit haben, wurden die Eingangsgrößen des Kinematikmodells von der VNCK erzeugt.
- Für die Untersuchung der Bewegungsdynamik in Grenzbereichen wurde schließlich ein geregeltes Mehrkörpermodell aufgebaut, das als Eingangsgröße ebenfalls von dem VNCK reale Lagesollwerte erhält.

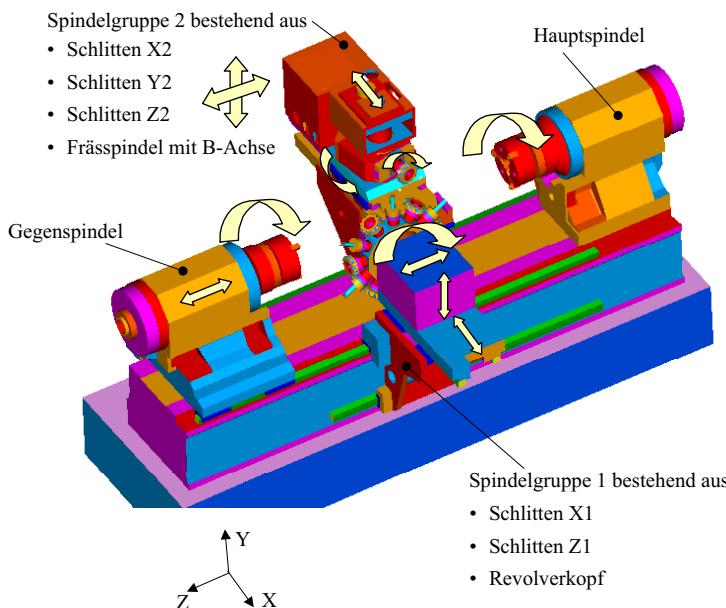


Abbildung 9-3: CAD-Modell des Dreh-Fräsbearbeitungszentrums

Da die Ausgangsmaschine noch nach der konventionellen Vorgehensweise, d. h. ohne den Einsatz von Simulationswerkzeugen entwickelt wurde, mussten alle Modelle von Grund auf neu aufgebaut werden. Um die hierfür anfallenden Zeiten gering zu halten, wurde bei der Modellbildung nach der neuen Vorgehensweise verfahren.

Zunächst wurden im Bibliotheksmodul des MS^2 die Mechatronik-Simulationsbausteine für die neue Werkzeugmaschine angelegt. Für das Dreh-Fräsbearbeitungszentrum also die Bausteine Bett, Hauptspindel, Gegenspindel, Schlitten X1 und Z1, Revolverkopf 1 und Revolver 1, Schlitten X2, Y2 und Z2, Gehäuse B-Achse und B-Achse sowie Kugelgewindespindeln und Spindelmuttern für alle Achsen. Für die Lagesollwerterzeugung und für die Antriebe und die Servomotoren — Standardkomponenten — wurden die hierfür vordefinierten Mechatronik-Simulationsbausteine der Simulationsumgebung verwendet.

Daraufhin wurde unter Berücksichtigung der Richtlinien für die durchgängige Modellbildung der Schnittstellen die 3D-CAD-Modellierung der Komponenten durchgeführt (Abbildung 9-3). Um das CAD-Referenzmodell allen an der Entwicklung Beteiligten zugänglich zu machen, wurden die CAD-Dateien in das Bibliotheksmodul des MS^2 eingestellt und die Schnittstellen dokumentiert. Abbildung 9-4 zeigt den Mechatronik-Simulationsbaustein "Schlitten-Z1". In der CAD-Sicht sind die Marker für die Schnittstellen (z. B. Krafteinleitungspunkte der Führungsschuh) deutlich zu erkennen sowie Linienzüge, die die Grundfläche der Führungsschuh eingrenzen. Entsprechend wurden die Marker in der FEM- und MKS-Sicht berücksichtigt.

Modell zur FEM-Analyse der Strukturmechanik

Im Anschluss an den Aufbau des 3D-CAD-Modells wurde mit der Analyse und Optimierung der Spindelgruppe 1 begonnen. Die erste Aufgabenstellung bestand in der Analyse der Eigenfrequenzen der Spindelgruppe 1 um festzustellen, ob die von dem Fräskopf zu erwartenden Schwingungen in einem kritischen Frequenzbereich der Spindelgruppe liegen. Hierzu wurde die Gesamtmaschine einer Eigenfrequenzanalyse auf Basis der FEM unterzogen. Die sich zu diesem Zeitpunkt noch in Entwicklung befindliche Fräseinheit wurde durch eine auf Erfahrungswerten basierende Masse auf dem Schlitten X2 berücksichtigt.

Für die Erstellung des FEM-Modells musste zunächst von den betroffenen Mechatronik-Simulationsbausteinen die erforderliche FEM-Sicht abgeleitet werden (Abbildung 9-4). Dies erfolgte auf Basis der CAD-Sicht der Mechatronik-Simulationsbausteine, wobei die in der CAD-Sicht festgelegten Schnittstellen in Form von Knoten an den jeweiligen Stellen des FEM-Netzes berücksichtigt wurden. Beim Aufbau des FEM-Modells in der FEM-Software wurde die Funktionalität der FEM-Programme genutzt, die Bauteilmasse, die Lage des Schwerpunkts sowie die Trägheitstensoren der einzelnen Komponenten berechnen zu können. Diese im Rahmen der FEM-Modellbildung berechneten Daten wurden ebenfalls in das MS^2 eingestellt.

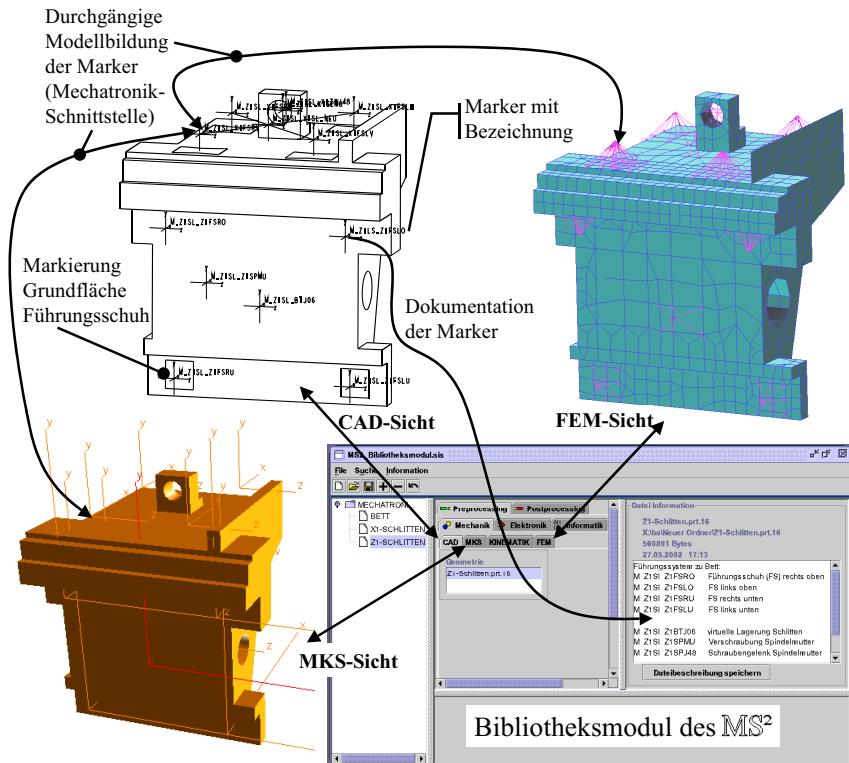


Abbildung 9-4: Durchgängige Modellbildung und Verwaltung des Mechatronik-Simulationsbausteins Schlitzen Z1

Modell zur Optimierung der Bewegungsdynamik

Wie dem Zeitplan zu entnehmen ist, wurde parallel zu der FEM-Analyse mit der Optimierung der Bewegungsdynamik der Spindelgruppe 1 begonnen. Dies erfolgte in Zusammenarbeit von Mechanik-, Elektrokonstruktion und NC-Programmierung. Für die Optimierung wurde zunächst das in Abbildung 8-16/1 dargestellte mechatronische Gesamtmodell bestehend aus VNCK, Modell der Antriebe und Starrkörper-MKS-Modell herangezogen (Abbildung 9-5). Hierzu wurde von der Elektrokonstruktion das Modell der Antriebe vorbereitet, während zeitgleich von der mechanischen Konstruktion das Modell der Mechanik aufgebaut wurde.

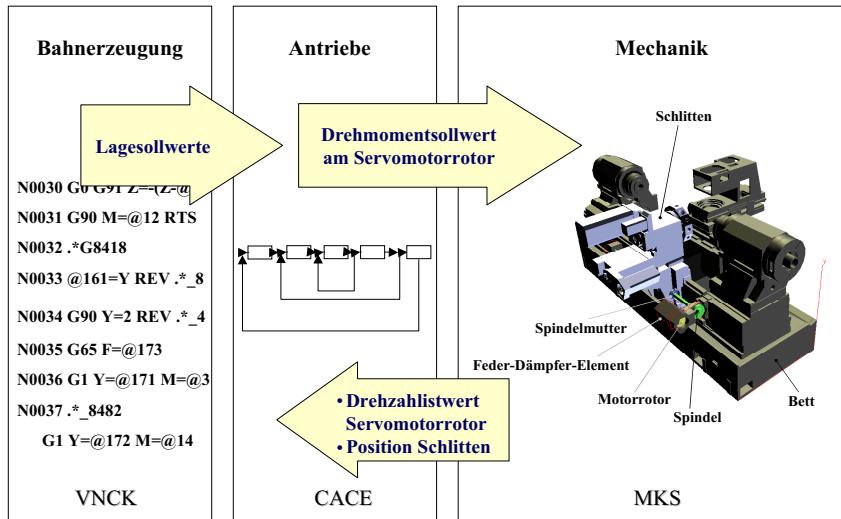


Abbildung 9-5: Mechatronisches Gesamtmodell zur Untersuchung der NC-gesteuerten Bewegungsdynamik

Ein Vergleich mit der FEM-Analyse zeigt, dass ein Großteil der für das MKS-Modell benötigten Informationen — Masse, Trägheitstensor, Schwerpunktslage — mit den aus der FEM-Analyse gewonnenen Daten identisch ist. Die Erzeugung der gemeinsamen Daten von FEM- und MKS-Sicht wurde durch das **MS²** gesteuert.

Für die Regelung wurde das parametrisierte Modell des Mechatronik-Simulationsbausteins "Antrieb" herangezogen. Dieser stellt das herstellerspezifische Modell der kaskadierten Lagerregelung einer NC-Achse zur Verfügung. Das Modell wurde mit Hilfe der grafisch, blockorientierten CACE-Software Matlab/Simulink (*Matlab 1996*) aufgebaut (Abbildung 9-6).

Die Schnittstelle zwischen mechanischer Konstruktion und Elektrokonstruktion bildet der Mechatronik-Simulationsbaustein "Servomotor". Wie der Abbildung 9-5 und Abbildung 9-6 zu entnehmen ist, integriert die Elektrokonstruktion die regelungs-technische Sicht des Servomotors in ihr Modell. Das mechanische Verhalten (Trägheit des Motorrotors) wird von der mechanischen Konstruktion berücksichtigt.

Mechatronisches Gesamtmodell der Spindelgruppe 1 (2 NC-Achsen)

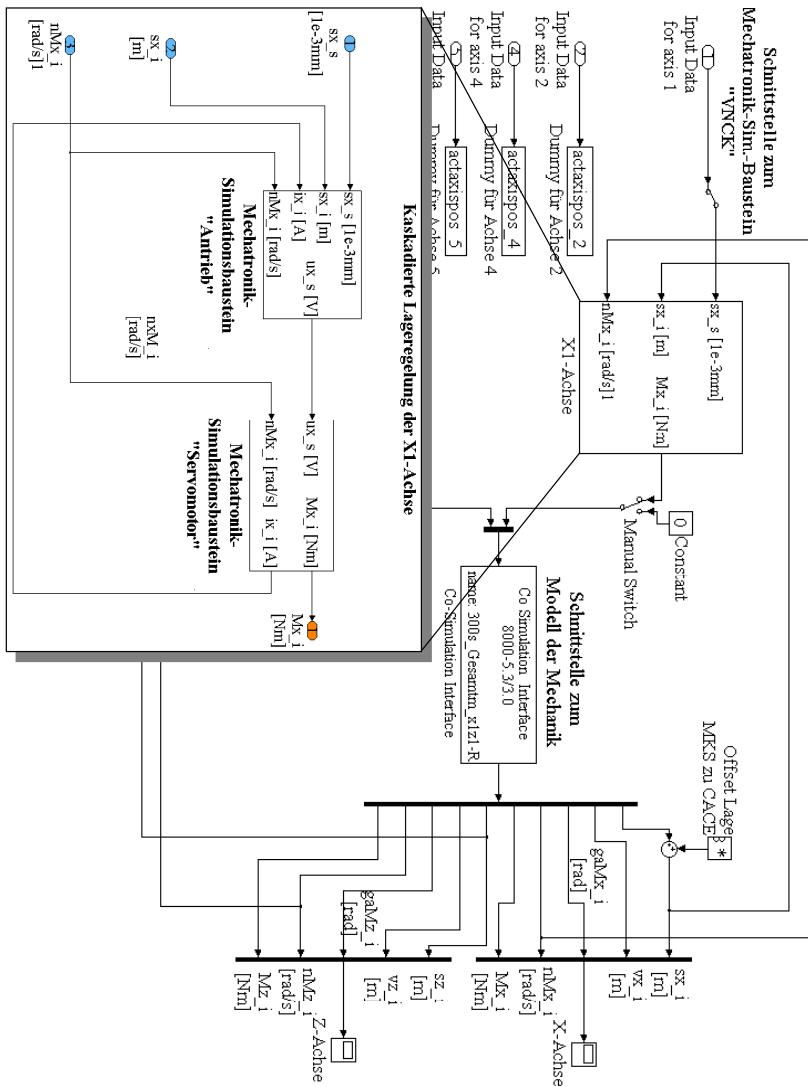


Abbildung 9-6: Modell der Elektrokonstruktion bestehend aus dem parametrischen Antriebsmodell, dem parametrischen Modell des Servomotors (für Details siehe Anhang) und der Schnittstelle zur Mechanik (Co-Simulation Block)

Das verwendete Regelungsmodell wurde im Rahmen der Ausarbeitung der Mechatronik-Simulationsbausteine (Kapitel 8.1.6) bereits ausführlich diskutiert, ganz im Gegensatz zu dem für die Auslegung der Vorschubantriebe realisierten Mechanik-Modell. Dies wird an dieser Stelle nachgeholt. Stellvertretend für die Modellbildung rotatorischer Vorschubachsen wird das MKS-Modell der Z1-Achse (Abbildung 9-7) vorgestellt. Das Modell lässt sich jedoch auf alle konventionellen Vorschubantriebe (Antrieb über Kugelgewindetrieb) übertragen.

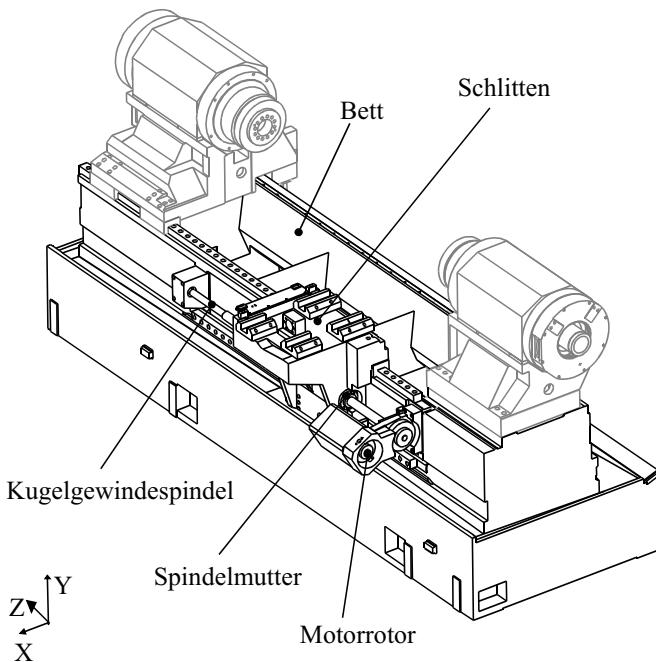


Abbildung 9-7: Mechanischer Aufbau des Vorschubantriebs der Z1-Achse

Mehrkörpermodell mit Starrkörpern

Das MKS-Modell der Antriebsmechanik zur Untersuchung der Bewegungsdynamik beschreibt die Zusammenhänge zwischen dem am Motorrotor angreifenden und davon auf die Antriebsmechanik übertragenen Moment sowie den daraus resultierenden rotatorischen und translatorischen Lagen der mechanischen Antriebskomponenten und deren Ableitungen. Von besonderem Interesse ist die Position und Lage des Schlittens bei den hier im Mittelpunkt stehenden großen Verfahrbewegungen. Für den in

Abbildung 9-7 abgebildeten Vorschubantrieb wurde die in Abbildung 9-8 dargestellte Modelltopologie gewählt. Eine Zusammenstellung der zur Beschreibung dieser Antriebsmechanik erforderlichen Parameter sowie die zugehörigen Quellenangaben sind in Tabelle 9-1 zu finden.

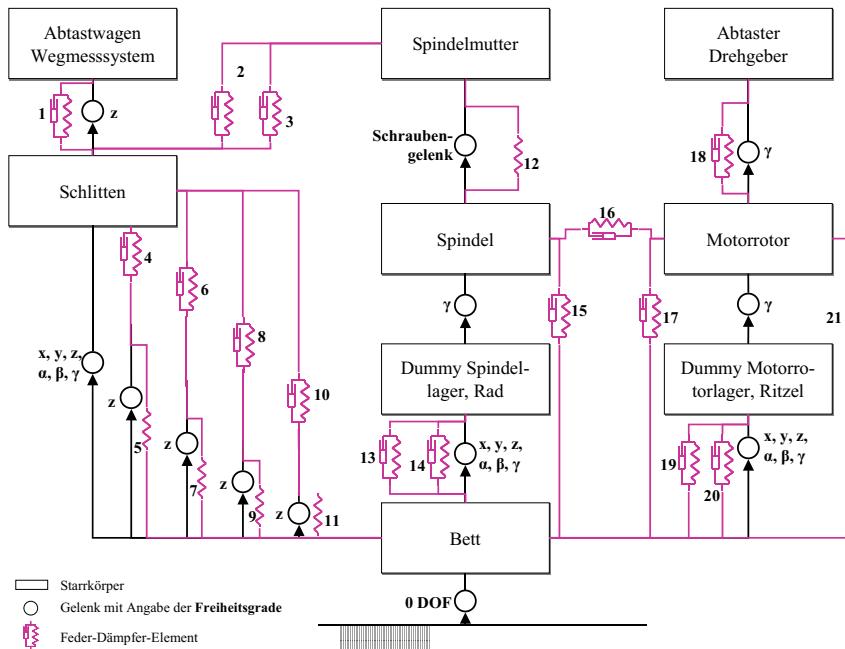


Abbildung 9-8: Topologie des Mehrkörpermodells zur Beschreibung der Bewegungsdynamik der in Abbildung 9-7 dargestellten Antriebsmechanik

Auf Grund der großen Masse des Bettes im Vergleich zu den bewegten Schlitten wurde davon ausgegangen, dass das Bett keine Bewegung gegenüber dem Hallenboden ausführt. Das Bett wurde daher mit einem Null-Freiheitsgradgelenk gegenüber dem Inertialsystem verbunden.

Der Antrieb der Mechanik erfolgt über das vom CACE-Modell des Servomotors gelieferte Drehmoment, das zwischen dem Stator des Motors und dem Motorläufer angreift. Der Motorrotor überträgt sein Drehmoment spielfrei auf das Ritzel des Riemengebriebes. Der Motorläufer ist gegenüber seinem Gehäuse durch eine Fest-Loslagerung fixiert. Die Übertragung des Drehmoments auf den Motorrotor erfolgt im Modell über ein Kraftelement zwischen Motorrotor und Bett (Nr. 21), da das Gehäuse

des Motorrotors fest mit dem Bett verbunden ist. Die Fest-Loslagerung des Motorrotors wird durch die beiden Kraftelemente 17 und 19 und das Sechs-Freiheitsgrade-Gelenk zwischen den Körpern "Bett" und "Dummy Motorrotorlager" realisiert. Ein Dummykörper ist ein Körper mit verschwindender Masse und Trägheitseigenschaften, der die physikalischen Eigenschaften des Modells nicht beeinflusst, aber geeignet ist, um als Hilfskörper eine bestimmte kinematische Kette zu ermöglichen. Kraftelement Nr. 17 repräsentiert dabei das Loslager und Nr. 19 das abtriebseitige Festlager. Am Ritzel des Körpers "Motorrotor" greift das Kraftelement 16 an, ein Getriebe-Kraftelement, in dem Steifigkeit und Dämpfung der Riemenstufe sowie das Übersetzungsverhältnis parametrisiert werden können. Voraussetzung für den Einbau dieses Kraftelements ist, dass die Körper, an denen das Getriebe-Kraftelement angreift, über je ein Gelenk mit einem rein rotatorischen Freiheitsgrad an dem ihnen vorausgehenden Körpern angebunden sind. Um folglich die Fest-Loslagerung des Motorrotors und gleichzeitig die Riemenstufe realistisch abbilden zu können, wird der Dummykörper "Dummy Motorrotorlager" eingeführt. So besitzt der Motorrotor zunächst ausschließlich einen rotatorischen Freiheitsgrad gegenüber dem Dummykörper. Seine sechs Freiheitsgrade erhält er durch Lagerung des Dummies gegenüber dem Bett mit sechs Freiheitsgraden zurück. Um den Dummykörper rotatorisch zu fesseln, wird die virtuelle Torsionsfeder Nr. 20 eingeführt.

Über das Getriebe-Kraftelement wird das Drehmoment von der Motorwelle auf die Kugelgewindespindel übertragen. Die Kugelgewindespindel war im vorliegenden Fall beidseitig vorgespannt gelagert. Die Modellbildung der Lagerung der Kugelgewindespindel erfolgte vom Aufbau her analog der Lagerung des Motorrotors. Im Unterschied zum Motorrotor werden den beiden Lagerungen der Spindel jedoch Steifigkeiten in radialer und axialer Richtung zugewiesen.

Die Umwandlung der Rotation der Kugelgewindespindel in die Translation erfolgt in der Modellbildung durch Einführung eines Schraubengelenks. Die in der Spindelmutter auf Grund von Vorspannung und Dichtungsmaterial auftretende Reibung wird mit Hilfe des Kraftelements Nr. 12 berücksichtigt. Nachgiebigkeiten und Dämpfungsanteile, die auf das Spindel-Mutter-System sowie auf die Verschraubung der Spindelmutter mit dem Schlitten zurückzuführen sind, werden zu je einem gemeinsamen Kraftelement für die Torsions- (Nr. 3) und Translationssteifigkeiten (Nr. 2) zusammengefasst.

Von besonderer Bedeutung ist weiterhin die Modellbildung des Führungssystems, da hier ein Großteil der mechanischen Nichtlinearitäten (Reibung, Stick-Slip, Steifigkeit usw.) verborgen sind. Die Auflast- und Seitenlaststeifigkeit und Dämpfung des Führungsschuhs werden durch die Kraftelemente zwischen dem Bett und dem Schlitten (Nr. 4, 6, 8, 10) realitätsgetreu nachgebildet. Reibung sowie Stick-Slip werden durch zusätzliche Kraftelemente realisiert, die dem Translationsgelenk parallel geschaltet werden (Nr. 5, 7, 9, 11).

Kategorie	Bauteil/Baugruppe	Marke	Parameter	Quelle
Allgemein			Gravitation	
			Kinematischer Aufbau der Maschine (Anordnung und Verfahrbereiche der Achsen)	CAD
Körper	Bett, Ständer, Schlitten, Kugelgewindetrieb		Geometrie	CAD
			Dimensionen	CAD
			Masse	CAD
			Lage des Schwerpunkts	CAD
			Trägheitstensor	CAD
Koppel-/Fügestellen	Kupplung Abtastwagen Wegmesssystem	1	Steifigkeit c_z und Dämpfung d_z	Herstellerangaben
	Verbindung zwischen Kugelgewindespindel und Schlitten über Spindelmutter	2	Resultierende Zug-/Drucksteifigkeit c_x, c_y, c_z und Dämpfung d_x, d_y, d_z aus der 1. Schraubverbindung Spindelmutter - Schlitten 2. resultierenden Steifigkeit der Wälzkörper zwischen Kugelgewindetrieb und Spindelmutter	Herstellerangaben
		3	Torsionssteifigkeit c_a, c_b, c_y aus der Schraubverbindung zwischen Spindelmutter und Schlitten	Formelsammlung
	Spindelmutter	12	Reibung in der Spindelmutter	Herstellerangaben
			Spindelsteigung	Antriebsauslegung
	Führungsschuhe	4, 6, 8, 10	Steifigkeit c_x, c_y und Dämpfung d_x, d_y	Herstellerangaben
		5, 7, 9, 11	geschwindigkeitsproportionale Reibung	Herstellerangaben

Kategorie	Bauteil/Baugruppe	Marke	Parameter	Quelle
	Lagerung Kugelgewindespindel	13, 15	1. Radialsteifigkeit c_x, c_y und Dämpfung d_x, d_y 2. Axialsteifigkeit c_z und Dämpfung d_z	Herstellerangaben
		14	virtuelle Torsionsfeder c_γ	Formelsammlung, Annahme
	Zahnriemengetriebe	16	Steifigkeit c_γ und Dämpfung d_γ	Herstellerangaben
			Übersetzungsverhältnis	Antriebsauslegung
	Lagerung Motorrotor	17	Radialsteifigkeit c_x, c_y und Dämpfung d_x, d_y	Herstellerangaben
		19	1. Radialsteifigkeit c_x, c_y und Dämpfung d_x, d_y 2. Axialsteifigkeit c_z und Dämpfung d_z	Herstellerangaben
		20	virtuelle Torsionsfeder c_γ	Formelsammlung, Annahme
	Kupplung Abtaster Drehgeber	18	Torsionssteifigkeit c_γ	Herstellerangaben
	Antriebsmoment	21	Drehmomentsollwert des Servomotorrotors	Modell der Elektronik

Tabelle 9-1: Parameter zur Beschreibung des MKS-Modells der Antriebsmechanik aus Abbildung 9-8 (Richtungsangaben beziehen sich auf Abbildung 9-7)

Als Output des Mechanikmodells wurden die Schlittenistposition und die Motoristdrehzahl abgegriffen. Diese Größen werden an der realen Maschine mit Glasmaßstäben bzw. Drehgebern erfasst. Die Signalgeber der Messsysteme sind über Kupplungen mit den bewegten Bauteilen verbunden. Im Modell werden die Abtaster als Massen berücksichtigt, die einen translatorischen Freiheitsgrad in Bewegungsrichtung haben. Die Kupplungen werden durch die Feder-Dämpfer-Elemente Nr. 1 und 18 berücksichtigt.

Hybrides Mehrkörpermodell bestehend aus Starrkörpern und flexiblen Körpern

Eine immer wieder bei Drehmaschinen zu lösende Aufgabenstellung ist eine schlechte Werkstückoberfläche bei unstetigem Eintauchen des Drehmeißels in das Material beim Längsdrehen. Diese wird auf Schwingungen zurückgeführt, die durch den stoßartigen

Werkzeugeingriff in das Material hervorgerufen werden. Um das Verhalten der Spindelgruppe 1 daraufhin untersuchen und optimieren zu können, wurde das elastische Verhalten der Schlitten in das Starrkörpermodell mit einbezogen (Abbildung 9-9). Der hierfür benötigte SID-Datensatz (s. Kapitel 5.1.1.3) konnte aus der für die FEM-Analyse erzeugten FEM-Sicht der Schlitten gewonnen werden.

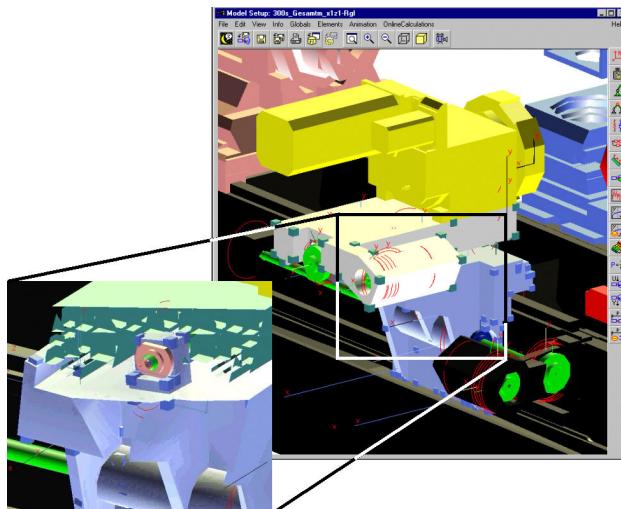


Abbildung 9-9: MKS-Modell mit flexiblen Körpern: Deformation des Schlittens Z1, hervorgerufen durch eine Schwingung auf Grund des Eintauchens des Drehmeißels in das Werkstück

Modell zur NC-Programmierung

Leicht zeitversetzt wurde auch von der NC-Programmierung mit dem Aufbau des hierfür vorgesehenen Simulationsmodells gemäß Abbildung 8-16/3 begonnen. Es handelt sich hier um ein Kinematikmodell der Maschine, das mit Lagesollwerten vom VNCK gespeist wird.

Als Geometriedaten für das Kinematikmodell wurden die aus der MKS-Modellbildung vorliegenden Daten verwendet, wobei auch hier das Auffinden der Daten durch das **MS²** erleichtert wurde. Somit konnte direkt mit der eigentlichen Modellbildung begonnen werden. Die ursprünglich notwendige Zeit für die Erstellung der Geometriefiles wurde eingespart.

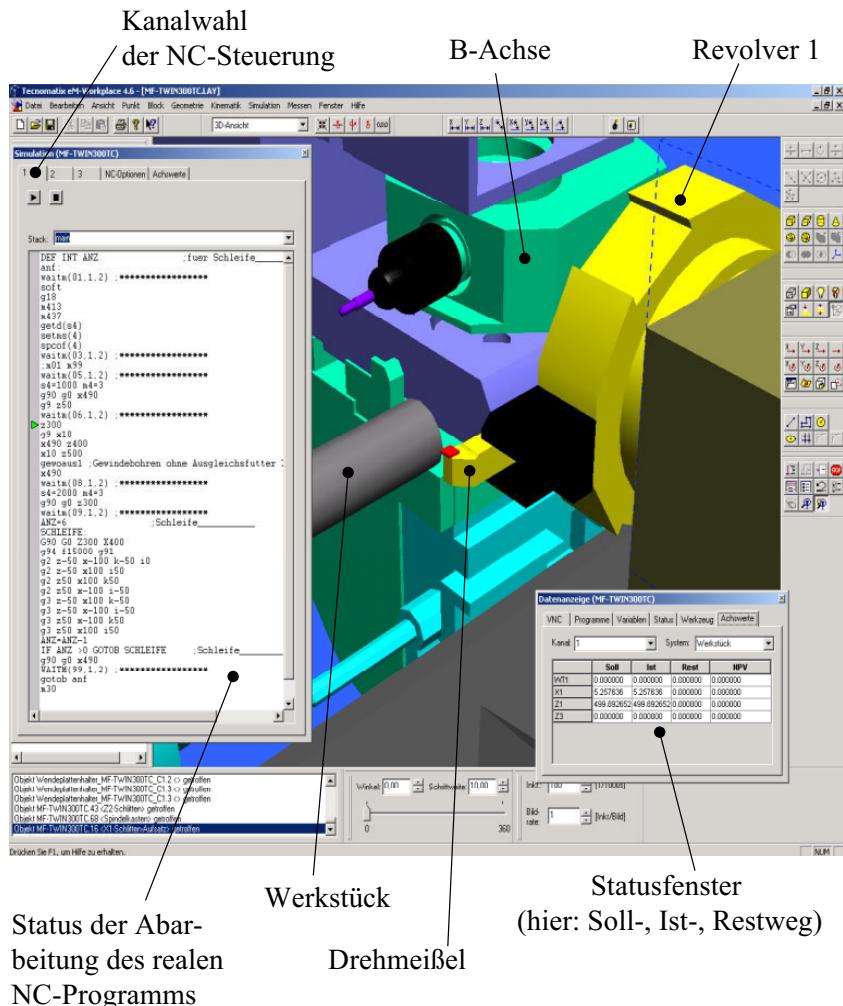


Abbildung 9-10: Kinematikmodell mit angekoppeltem VNCK

Da zur Bahnerzeugung der VNCK zur Verfügung steht, konnte die NC-Programmierung direkt anhand der realen Steuerung erfolgen. Es war also keine Nacharbeit zwischen simuliertem NC-Programmcode und dem Programm, das an die Maschine gegeben wird, nötig. Hierdurch konnte eine weitere Verringerung des Aufwands für die Simulation erreicht werden.

9.3 Bewertung der Simulationsumgebung

Abschließend soll die neue Methode zum Aufbau mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle kritisch bewertet werden. Hierzu wird der Nutzen der neuen Vorgehensweise dem damit verbundenen Aufwand gegenübergestellt (Abbildung 9-11).

Wie aus der Darstellung des Ablaufs des Entwicklungsprojekts deutlich wurde, fand eine enge Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachabteilungen statt. Ein wesentlicher Nutzen der neuen Vorgehensweise ist die verbesserte innerbetriebliche Zusammenarbeit bei der mechatronischen Produktentwicklung auf Basis virtueller Prototypen. Während früher jede Abteilung und jeder Berechnungsingenieur aufgabenspezifisch eigene Modelle aufbaute, stellt die neue Vorgehensweise Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, die die Zusammenarbeit aller an der Entwicklung Beteiligten verbessern. Die Methode unterstützt dabei alle Phasen der virtuellen Produktentwicklung von der Modellbildung, über die Durchführung der Simulationsexperimente bis hin zur Dokumentation und Verwaltung der Simulationsergebnisse.

Dies beginnt damit, dass die Simulationsumgebung darauf ausgerichtet ist, die Entwicklungsingenieure bei all ihren Berechnungsaufgaben umfassend und ganzheitlich über die in den anderen Abteilungen geleisteten Arbeiten zu informieren. Denn auf Grund der neuen Methode ist es möglich, einen Großteil der bereits existierenden Daten und Modelle wiederzuverwenden, wodurch sich der Aufwand für die Modellbildung deutlich reduziert. Des Weiteren wird durch den damit erzielten hohen Wiederverwendungsgrad die Generierung redundanter Daten vermieden.

Sollten benötigte Daten nicht zur Verfügung stehen, gibt die Methode Richtlinien für deren Generierung und die dabei vorzusehenden Schnittstellen an die Hand. Wesentliches Element hierfür sind die modularen Mechatronik-Simulationsbausteine. Durch die Systemgrenze der Mechatronik-Simulationsbausteine wird sowohl die abteilungsinterne, als auch die abteilungsbürgreifende Durchgängigkeit der Daten und Modelle sichergestellt. Des Weiteren erleichtert die hohe Modularität eine einfache Adaption der Mechatronik-Simulationsbausteine an neue Aufgaben.

Die Mechatronik-Simulationsbausteine sind für die verschiedensten Maschinen und über viele Generationen anwendbar. Durch Wiederverwendung der validierten Mechatronik-Simulationsbausteine kann somit im Laufe der Zeit der Aufbau der virtuellen Modelle beschleunigt werden, wodurch eine Reduzierung der Time to Market erreicht werden kann. Zudem wird das Entwicklungsrisiko minimiert.

Nutzen	Aufwand
<ul style="list-style-type: none"> ■ Optimierung der abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit ■ Aufgabenspezifische Datenaufbereitung und -bereitstellung ■ Vermeidung redundanter Daten ■ Reduzierung des Modellbildungsaufwands durch Durchgängigkeit der sichtenspezifischen Modelle ■ Verkürzung der Time to Market und Minimierung des Entwicklungsrisikos durch Wiederverwendung validierter Mechatronik-Simulationsbausteine ■ Simulationsumgebung als Voraussetzung für die gesamtheitliche Werkzeugmaschinenauslegung ■ Anforderungsgerechte Werkzeugmaschinenauslegung ■ Wettbewerbsvorteil durch überzeugende Angebotserstellung auf Basis eines virtuellen Prototyps ■ Produktivitäts- und Kostenvorteile ■ Vermeidung von Ausfallzeiten durch Kollision 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kosten für Aufbau und Betrieb der IT-Infrastruktur (PDM-System, umfangreiche Simulationspaket) ■ Aufwand für Personalqualifizierungsmaßnahmen ■ Unternehmensspezifische Anpassung des PDM-Systems ■ Aufbau der Mechatronik-Simulationsumgebung ■ Modellbildung und Validierung der Mechatronik-Simulationsbausteine ■ Informationsbeschaffung: Spezifikationen, Modellbeschreibungen

Abbildung 9-11: Gegenüberstellung von Nutzen und Aufwand der neuen Vorgehensweise

Der Hauptnutzen der Methode liegt jedoch in den Regeln für den modularen Aufbau mechatronischer Modelle. So erlaubt die Simulationsumgebung mit ihren unterschiedlichen Modellen die äußerst realitätsnahe Simulation des dynamischen Verhaltens der Vorschubantriebe und deren Einfluss auf die Gesamtmaschine unter Berücksichtigung aller steuerungs- und Regelungstechnischen Funktionen. Am

virtuellen Modell kann beispielsweise ein überdimensionierter Antrieb erkannt werden, der seine Leistung bzw. Dynamik nicht voll entfalten kann, da er sonst die Mechanik zu stark zu Schwingungen anregen würde. Am virtuellen Modell kann folglich bereits die von der realen Maschine erreichbare Dynamik festgestellt und Optimierungspotenzial in die Konstruktion zurückgesteuert werden. Weiterhin ist eine exakte Simulation der räumlichen Bewegungsdynamik der bewegten Maschinenkomponenten und des Tool Center Points möglich. Dabei werden die in den Koppelstellen auftretenden Kräfte und Momente ermittelt. Der Konstrukteur besitzt somit ein Hilfsmittel zur optimalen Bauteilauslegung und Lebensdauerberechnung von Lagern und Führungen.

Des Weiteren können mit Hilfe der Simulationsumgebung auch im Vertrieb Wettbewerbsvorteile erzielt werden. So kann der Werkzeugmaschinenhersteller bereits in der Angebotsphase dem Kunden gegenüber anhand des Modells glaubwürdiger versichern, dass die für ihn zu entwickelnde Werkzeugmaschine die zugesicherten Eigenschaften erfüllt.

Und auch für den Anwender der Werkzeugmaschinen kann die entwickelte Simulationsumgebung von Nutzen sein, gerade wenn es sich um komplexe Maschinen mit mehreren Werkzeugträgern und Werkstückspindeln handelt. Da das neue Werkzeugmaschinenmodell auf Grund des VNCK wesentlich genauere Ergebnisse in Bezug auf die Bewegungsbahn des TCP liefert als die heute eingesetzten Modelle, können Grenzsituationen der Bearbeitung um ein Vielfaches besser beurteilt werden. Gerade in der Serienfertigung lassen sich auf diese Weise wertvolle Bearbeitungsnebenzeiten einsparen und so Produktivitäts- und Kostenvorteile erzielen. Zudem werden Ausfallzeiten durch Kollision vermieden.

Um diese Vorteile nutzen zu können, sind jedoch an verschiedenen Stellen Investitionen notwendig. So sind gerade im Werkzeugmaschinenbau umfangreiche Simulationspakete wie MKS, FEM oder CACE noch nicht Standard und auch die PDM-Systeme finden erst in letzter Zeit Einzug in die Unternehmen.

Eine wichtige Voraussetzung für die Einführung von Simulationswerkzeugen ist weiterhin die Existenz kompetenter Mitarbeiter. Neben Kenntnissen in der Anwendung der Simulationsprogramme ist vor allem das Verständnis für die inneren Wirkzusammenhänge des zu entwickelnden Systems erforderlich. Um diese zu vermitteln, sind in der Regel mit der Einführung der Software Schulungen unumgänglich.

Wie in der Arbeit vorgestellt, ist für die mechatronische Produktentwicklung die Verknüpfung der Simulationsarbeitsplätze durch ein zentrales Datenmanagementsystem unumgänglich. Die Effektivität des PDM-Systems hängt dabei wesentlich von der korrekten Unterstützung der unternehmensspezifischen Abläufe ab. Da diese in der Regel nicht in allen Details bekannt sind, entstehen zunächst Kosten für die Analyse der individuellen Unternehmensabläufe und im Anschluss daran für die Anpassung sowie die Einführung.

Dasselbe gilt für den Aufbau der Simulationsumgebung. Neben der Auswahl und Anschaffung der Software müssen die Schnittstellen analysiert und aufeinander abgestimmt werden. Des Weiteren müssen die Bibliotheken angelegt und für häufig verwendete Komponenten entsprechende Mechatronik-Simulationsbausteine aufgebaut werden.

Der Aufbau der Modelle setzt die Kenntnis einer Vielzahl an physikalischen Zusammenhängen, Herstellerangaben, Modellbeschreibungen usw. voraus. Die Aneignung bzw. Beschaffung stellt einen weiteren Aufwand dar.

Nicht zuletzt erfordert die erfolgreiche virtuelle Produktentwicklung die Validierung der Simulationsergebnisse durch Messungen an der realen Maschine.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Nutzenpotenzial, insbesondere bei konsequenter Anwendung durch den damit verbundenen Aufbau einer Daten- und Wissensbasis, die Nachteile bei weitem aufhebt. Ein quantitativer Wert, um wie viel die Entwicklungszeit durch die neue Methode verkürzt werden kann, lässt sich aus diesem Projekt nicht gewinnen. Da ein derart umfangreiches Entwicklungsprojekt auf Basis eines virtuellen Prototypen in dieser Form bisher nicht durchgeführt wurde, musste sehr viel Aufwand für Schulung und Datenbeschaffung betrieben werden, weshalb das Projekt hinsichtlich Verkürzung der Entwicklungszeit keine repräsentative Aussage zulässt.

10 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Thematik der Werkzeugmaschinenentwicklung als mechatronisches Gesamtsystem auf Basis virtueller Prototypen behandelt. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bestand in der Entwicklung einer Vorgehensweise und unterstützender Werkzeuge zur durchgängigen Modellbildung mechatronischer Werkzeugmaschinenmodelle. Durchgängig bezeichnet dabei die größtmögliche Wiederverwendbarkeit einmal generierter Daten sowie die Kompatibilität der Modelle der verschiedenen Fachbereiche. Der Fokus liegt von wirtschaftlicher Seite auf der Effektivitätssteigerung der Modellbildung und von technischer Seite auf der Bereitstellung einer Simulationsumgebung, die die vollständig virtuelle Auslegung der NC-gesteuerten Bewegungsdynamik einer Werkzeugmaschine ermöglicht.

Anstoß hierfür gab die aktuelle Situation in den Entwicklungsabteilungen der Werkzeugmaschinenbranche. Diese lässt sich im Wesentlichen folgendermaßen charakterisieren: NC-Werkzeugmaschinen stellen einen entscheidenden Schlüssel faktor der Produktionstechnik dar. Daher werden immer höhere Anforderungen an die Produktivität und die Bearbeitungsqualität der Maschinen gestellt. Ihre Entwicklung findet auf Grund der großen nationalen und internationalen Konkurrenz unter enormem Innovations-, Kosten- und Zeitdruck statt. Um in diesem Umfeld bestehen zu können, wird es immer wichtiger, Wettbewerbsvorteile am Markt zu erlangen. Daher sind Maßnahmen zu ergreifen, die eine Verkürzung der Entwicklungszeiten, eine Verringerung des Aufwands für Prototypen und eine schnelle Reaktion auf Kundenforderungen ermöglichen. Diese Maßnahmen treffen den Kern der Produktentwicklung, da einerseits auf Grund der immer weiter steigenden Anforderungen an die Produktivität und damit an die Bewegungsdynamik die gesamtheitliche Optimierung von Bahnerzeugung, Antriebstechnik und Mechanik immer wichtiger wird. Andererseits aber weist die Produktentwicklung bereits heute wesentliche Defizite hinsichtlich Überschreitung von Entwicklungszeiten und Entwicklungskosten auf. Als Lösungsansatz setzen die Werkzeugmaschinenhersteller immer stärker auf den Simulationseinsatz.

Eine Analyse des bisherigen Vorgehens bei der simulationsgestützten Entwicklung hat gezeigt, dass die Simulation bisher derart in den Unternehmen eingeführt ist, dass jede Abteilung ihre eigenen, aufgabenspezifischen Modelle aufbaut. Die direkte Wiederverwendung oder Adaption bereits vorhandener Modelle in neue Modelle ist meist nicht möglich oder mit erheblichem Aufwand verbunden. Entsprechend wird mit der Verwaltung von Spezifikationen oder Simulationsergebnissen sowie dem für die Modellbildung notwendigen Know-how verfahren. Statt Synergien zu nutzen und die Modellbildung dadurch zu beschleunigen, wird auf Grund des bisher noch enormen Aufwands für die Modellerstellung die Simulation heute nur partiell eingesetzt. Eine durchgängige Modellbildung, wie sie die mechatronische Produktentwicklung erfordert, findet bisher nicht statt.

Als Lösungsansatz wurde ein methodisches Vorgehensmodell zur Modellbildung von Werkzeugmaschinen als mechatronisches System erarbeitet. Kern der Methodik ist die Integration der Vorgehensweisen der verschiedenen, an der Entwicklung beteiligten Fachabteilungen bei der Modellbildung. Damit lassen sich die Abhängigkeiten zwischen mechanischen, elektronischen und Informationen verarbeitenden Komponenten in der Funktionsstruktur eines mechatronischen Systems besser beherrschen. Im Mittelpunkt der Modellbildung steht die Auslegung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen.

Ein wesentlicher Aspekt der neuen Methode bestand in der Modularisierung dieses integrierten Modellbildungsprozesses. Ziel der Modularisierung ist es, die Qualität der Simulationsmodelle zu verbessern, indem das abteilungsspezifisch vorhandene Know-how zum Aufbau der Modelle optimal genutzt wird, und gleichzeitig der Aufwand für die Modellbildung durch Erhöhung des Wiederverwendungsanteils von Informationen reduziert wird. Hierzu wurde ein Vorgehen auf Basis von modularen Mechatronik-Simulationsbausteinen erarbeitet. Wie nämlich während der Analyse des mechatronischen Entwicklungsprozesses gezeigt wurde, sind zur Auslegung eines mechatronischen Systems die unterschiedlichsten Simulationsmodelle erforderlich. Aufgabe der Mechatronik-Simulationsbausteine ist es, die Modellbildung dieser unterschiedlichen Sichten für eine Komponente durchgängig zu gestalten. Innerhalb der Einführung der Mechatronik-Simulationsbausteine wurden daher Richtlinien für die Wahl der Systemgrenze, der für die Auslegung des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine erforderlichen Mechatronik-Simulationsbausteine, vorgestellt. Die Mechatronik-Simulationsbausteine zeichnen sich neben der Systemgrenze durch Schnittstellen aus. Die Schnittstellen repräsentieren die Koppelstellen zwischen den Mechatronik-Simulationsbausteinen. Ein wesentlicher Schwerpunkt bestand folglich in der Erarbeitung von Richtlinien, wie diese Schnittstellen zu modellieren sind, damit auch bezüglich der Verknüpfung der Mechatronik-Simulationsbausteine Durchgängigkeit sichergestellt ist. In Folge der so erzielten Modularität lassen sich aus den Mechatronik-Simulationsbausteinen aufgabenspezifische Simulationsmodelle konfigurieren.

Zudem wurde gezeigt, dass insbesondere bei der Simulation mechatronischer Systeme, auf Grund des Zusammentreffens von Informationen aus den Bereichen Mechanik, Elektronik und Informationsverarbeitung, eine Vielzahl an Informationen anfallen. Als weiterer Aspekt wurde daher ein integriertes Datenkonzept für alle im Rahmen der Simulation mechatronischer Systeme anfallenden Daten erarbeitet. Dieses umfasst die Datenverwaltung und die mechatronikgerechte Datenbereitstellung.

Um die Anwendung der Methode zu unterstützen, wurde eine Software, das so genannte Mechatronik-Simulation Management System, entwickelt. Mit seinen beiden Modulen "Bibliotheksmodul" und "Simulationsprojektmodul" verwaltet es disziplin- und simulationsmethodenspezifisch alle notwendigen und anfallenden Modelle und Daten. Während das Bibliotheksmodul dem Aufbau der Mechatronik-Simulationsbausteine dient und hierfür entsprechende Hilfsmittel zur Verfügung stellt, unterstützt

das Simulationsprojektmodul den Aufbau und die Dokumentation der simulationsmethodenspezifischen Modelle sowie der mechatronischen Gesamtsystemmodelle und deren Simulationsergebnisse. Die neue Methode, die unterstützenden Werkzeuge und die erforderliche IT-Infrastruktur werden zu dem Begriff "Simulationsumgebung" zusammengefasst.

Aufbauend auf der Konzeption der Methode, der Werkzeuge und der IT-Infrastruktur erfolgte der Aufbau der Modellebene. So wurden die für die Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen erforderlichen Mechatronik-Simulationsbausteine definiert und für die Modellbildung der dazwischen liegenden Schnittstellen Regeln formuliert. Des Weiteren wurden für Standard Mechatronik-Simulationsbausteine wie die Antriebsmodule oder die Bahnerzeugung vordefinierte Mechatronik-Simulationsbausteine aufgebaut. Besonders soll hier der Mechatronik-Simulationsbaustein des virtuellen NCK hervorgehoben werden. Denn, wie aus der Beschreibung der Ausgangssituation zu entnehmen ist, wird im Rahmen der gesamtheitlichen Optimierung von Werkzeugmaschinen die Einbeziehung der Lagesollwerterzeugung in den Optimierungsprozess immer wichtiger. Daher wurde dem Wunsch der Werkzeugmaschinenhersteller nachgekommen, die Bahnerzeugung ausgehend vom realen NC-Programm und der realen NC-Steuerung im Modell berücksichtigen zu können, und ein realer NCK als Mechatronik-Simulationsbaustein entwickelt.

Anhand der beispielhaften Entwicklung eines Dreh-Fräsbearbeitungszentrums wurde die Praxistauglichkeit der neuen Methode nachgewiesen und der damit erzielbare Nutzen aufgezeigt.

Ausblickend kann festgehalten werden, dass mit der vorliegenden Arbeit der durchgängige Aufbau unterschiedlicher Sichten auf das reale System "Werkzeugmaschine" methodisch aufgearbeitet wurde. Dabei hat sich gezeigt, dass der größte Modellbildungsaufwand im Bereich der Mechanik liegt. Die Ursache hierfür ist, dass sich mit jeder Neu- oder Weiterentwicklung die Mechanik ändert. Von Steuerungs- und Antriebsseite werden kommerzielle Komponenten zugekauft, so dass einmal hierfür aufgebaute Modelle über einen größeren Zeitraum wiederverwendet werden können. Um daher die Effektivität der Modellbildung der Mechanik weiter zu steigern, sollte ein nächster Schritt darin bestehen, die systematisch aufgearbeiteten Schnittstellen als Funktionsfeatures zu nutzen, um darauf aufbauend die kinematischen Ketten und damit die Modelle automatisch erstellen lassen zu können.

Des Weiteren wäre ein weiterer Ausbau der Standard-Mechatronik-Simulationsbausteine wünschenswert. Wie in Kapitel 3.1 „Aufbau und Funktionsweise einer Werkzeugmaschine“ erläutert wurde, setzt sich eine Werkzeugmaschinensteuerung aus NCK und SPS zusammen. Bisher wurde nur für den NCK ein entsprechender Mechatronik-Simulationsbaustein entwickelt. Prinzipielle Möglichkeiten zur Integration eines vergleichbaren Bausteins für die SPS wurden zwar vorgestellt. Der zugehörige Mechatronik-Simulationsbaustein wurde aber nicht aufgebaut, da er für die Auslegung der Bewegungsdynamik nur untergeordnete Bedeutung hat. Stünde auch

10 Zusammenfassung und Ausblick

für die SPS ein Mechatronik-Simulationsbaustein zur Verfügung, könnte das Anwendungsfeld der vorgestellten Modelle erweitert (z. B. Auslegung der Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen) sowie die Präzision der Aussagen der Simulationsmodelle weiter gesteigert (z. B. präzisere Berücksichtigung von Nebenzeiten durch SPS-gesteuerte Abläufe) werden.

Literatur

ABRAMOVICI & BICKELMANN 1993

Abramovici, M.; Bickelmann, S.: *Engineering Daten Management (EDM)*. CIM Management 9 (1993) 5, S. 20 - 28.

AHAMIETZ U. A. 2002

Adamietz, P.; Giwerzew, D; Schwaibold, T.; Wierschin, G.; Zagel, M.: *PDM-Anbindung*. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: integrierte Virtuelle Produktentstehung: Fortschrittsbericht II März 2002. München: Hanser 2002, S. 24-32.

AHLE 2000

Ahle, U.: *Bedeutung von PDM-Systemen für die virtuelle Produktentstehung - Aktuelle Marktentwicklungen und Trends*. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung, Berlin. Tagungsband 2000, S. 337 - 349.

ALBERT 1998

Albert, J.: *Software-Architektur für virtuelle Maschinen*. TU München: Dissertation 1998.

ALBERTZ 1995

Albertz, F.: *Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen-Gestellstrukturen*. Berlin: Springer 1995. (iwb Forschungsberichte 93).

ANDERL 1993

Anderl, R.: CAD-Schnittstellen: *Methoden und Werkzeuge zur CA-Integration*. München: Hanser 1993. (Praxiswissen CA ...-Techniken)

ANTON U. A. 2002

Anton, O.; Lercher, B.; Oertli, T.: *Funktionsmodellierung und Dynamikoptimierung beim mechatronischen Systementwurf*. In: Reinhart, G.: Mechatronische Produktionssysteme: Genauigkeit gezielt entwickeln, München: Utz 2002, S. 1-0 - 1-17.

ARNDT 2000

Arndt, H.: *Auslegung und Bewertung von Vorschubantrieben mit Spindel-Mutter-Systemen*. Dresden: Hausdruckerei TU Dresden 2000. (Lehre, Forschung, Praxis).

AUGSTEN 1969

Augsten, G.: *Einfluss von Spiel und Reibung auf die Konturfehler bahngesteuerter Werkzeugmaschinen*. Steuerungstechnik 2 (1969) 3, S. 103-108.

AUSLANDER 1996

Auslander, D.M.: *What is Mechatronics?* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 1, S. 5-9.

BALASUBRAMANIAN 2002

Balasubramanian, B.: *Digitale Produktentwicklung am Beispiel der neuen Mercedes-Benz E-Klasse*. In: Virtual Product Creation 2002: 6. Automobiltechnische Konferenz 2002: iViP Abschlusskonferenz, Berlin. Tagungsband 2002.

BANKS 1998

Banks, J.: *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. New York: "A Wiley-Interscience publication" 1998.

BARG & DEISENROTH 1995

Barg, J.; Deisenroth, J.: *Genauigkeitsbestimmende Steuerungsfunktionen*. ZWF 90 (1995) 5, S. 232 - 235.

BAUDISCH U. A. 2001

Baudisch, T.; Denkena, B.; Gose, H.; Landwehr, R.; Liu, Z.; Volkwein, G.: *Simulation mechatronischer Systeme*. In: Krause, F.-L. u. a.: Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung, Fortschrittsbericht April 2001. München: Hanser 2001, S. 135-140.

BEITZ 2001

Beitz, W. (Hrsg.): *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Aufl. Berlin: Springer 2001.

BENDER 1998

Bender, K.: *Software - Technologietreiber für den Maschinenbau*. VDMA-Nachrichten (1998) 9.

BERKEMER 1998

Berkemer, J.: *Fortschritte in der gekoppelten Simulation von Antriebsregelung und Maschinenstruktur*. In: Streckhardt, A.: XXV. FEM-Kongress, Baden-Baden. Ennigerloh: Streckhardt 1998.

BESTLE 1994

Bestle, D.: *Analyse und Optimierung von Mehrkörpersystemen*. Berlin: Springer 1994.

BESTLE U. A. 1998

Bestle, D.; Meier, H.; Glora, M.; Kreusch, K.: *Vorabinbetriebnahme numerischer Steuerungen mit simulierten Werkzeugmaschinen*. Industrie Management 14 (1998) 5, S. 49-52.

BIANCHI & PAOLUCCI 1996

Bianchi, G.; Paolucci, F.: *Towards Virtual Engineering in Machine Tool Design*. Annals of the CIRP 45 (1996) 1, S. 381-384.

BOSCH 2002

Robert Bosch GmbH (Hrsg.): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 24. Auflage. Braunschweig: Vieweg 2002.

BRAHMS 1998

Brahms, U.: *Regelung von Lineardirektantrieben für Werkzeugmaschinen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998. (Fortschritt Berichte VDI Reihe 8 Nr. 735).

BRANDENBURG & PAPIERNIK 1996

Brandenburg, G.; Papiernik, W.: *Feedforward and Feedback Strategies Applying the Principle of Input Balancing for Minimal Tracking Errors in CNC Machine Tools*. In: 4th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC 1996-MIE Japan. Tagungsband 1996.

BREMER & PFEIFFER 1992

Bremer, H.; Pfeiffer, F.: *Elastische Mehrkörpersysteme*. Stuttgart: Teubner, 1992.

BRETSCHNEIDER 2000

Bretschneider, J.: *Reglerselbststeinstellung für digital geregelte elektromechanische Antriebssysteme an Werkzeugmaschinen*. Heimsheim: Jost Jetter 2000. (ISW Forschung und Praxis 134).

BRETSCHNEIDER 1996

Bretschneider, J.: *Automatisierte Inbetriebnahme Digitaler Antriebe*. In: Pritschow, G.: *Moderne Regelungs- und Antriebstechnik: In Theorie und Praxis*, Stuttgart: TU Stuttgart: ISW, Umdruck zum Seminar 1996.

BROCKHAUS 2001

Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 24 Bänden. Leipzig: Brockhaus 2001.

BRUSSEL 1996

Brussel van, H.: *Mechatronics – A Powerful Concurrent Engineering Framework.* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 2, S. 127-136.

BRUSSEL U. A. 2001

Brussel van, H.; Sas, P.; Németh, I.; Fonseca de, P.; Braembussche van den, P.: *Towards a mechatronic Compiler.* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 6 (2001) 1, S. 90-105.

BÜRGEL 2001

Bürgel, R.: *Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digitalen Antrieben.* MÜNCHEN: Utz 2001. (iwb Forschungsberichte 151).

CHRISTOV 1995

Christov, S.: *Einbaugenauigkeit und Querschnittsberechnung von Profilschienenführungen.* TU Dresden: Dissertation 1995.

DENKENA & LIU 2001

Denkena, B.; Liu, Z.: *Virtuelle Werkzeugmaschinen verkürzen Entwicklungszeiten: Innovative Simulationsumgebung für mechatronische Systeme.* NCFertigung (2001) 3.

DENKENA U. A. 2002

Denkena, B.; Tracht, K.; Rehling, S.: *Simulationsmodul für Maschinendynamik im Rahmen eines Fertigungssimulationssystems.* wt Werkstatttechnik online 92 (2002) 5, S. 223-225.

DIN 6580

DIN 6580: *Begriffe der Zerspanetechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges.* Berlin: Beuth 1985.

DIN 66025

DIN 66025: *Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen.* Berlin: BEUTH 1981.

EDDON & EDDON 1998

Eddon, G.; Eddon, H.: *Inside distributed COM.* Unterschleißheim: Microsoft Press, 1998.

EHRENSTRASSER U. A. 2002

Ehrenstrasser, M.; Pörnbacher, C.; Wünsch, G.: *Virtuelle Werkzeugmaschinen für die Simulation: 3D-Visualisierung von HIL-Simulationen.* <<http://www.technikwissen.de/wt/aktuell/ausgabedetail.asp?id=9950&heft=05/2002>> (15.05.2002)

EHRLENSPIEL 1995

Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion.* München: Hanser 1995.

EIGNER & ZAGEL 2000

Eigner, M.; Zagel, M.: *Verbesserung von Engineering-Prozessen durch föderierte PDM-Konzepte.* In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung, Berlin. Tagungsband 2000, S. 177 - 189.

ENSELMANN 1999

Enselmann, A.: *HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Optimierung.* Essen: Vulkan 1999. (Schriftenreihe des ISF 4).

EUBERT 1992

Eubert, P.: *Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe.* Berlin: Springer 1992. (IWB Forschungsberichte 51).

EUBERT 1988

Eubert, P.: *Starke Konzeptionsphase: Optimierung elektrischer Vorschubantriebe für NC-Systeme.* Die neue Fabrik (1988).

EVERSHEIM 1999

Eversheim, W.: *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung.* In: Eversheim, W.; Schuh, G.: *Produktion und Management: 2. Produktmanagement.* Berlin: Springer 1999, S. 7-124 - 7-149.

EVERSHEIM 1998

Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik: 2. Konstruktion.* Berlin: Springer 1998.

EVERSHEIM U. A. 2002A

Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Weck, M.; Schuh, G.: *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik.* VDI-Z 144 (2002) 5, S. 36-41.

EVERSHEIM U. A. 2002B

Eversheim, W.; Schmidt, K.; Weber, P.: *Virtualität in der Wertschöpfungskette: Durchgängig von der Produktentwicklung bis zur Produktionsplanung.* wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 149-153.

FAHRBACH U. A. 1995

Fahrbach, C. u. a.: *Lineardirektantriebe für Vorschubachsen haben eine hohe Leistungsfähigkeit.* Maschinenmarkt 101 (1995) 44, S. 42-48.

FAUSER 1997

Fauser, M.: *Steuerungstechnische Maßnahmen für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung: Geometriedatenverarbeitung auf der Basis von Splines und bandbegrenzende Führungsgrößen-Erzeugung.* Aachen: Shaker 1997. (WZL Berichte aus der Produktionstechnik 97,7)

FELDMANN 2000

Feldmann, K.: *Simulation im betrieblichen Alltag.* In: Feldmann, K.; Reinhart, G.: *Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion.* Berlin: Springer 2000, S. 1-12.

FELDMANN & CHRISTOPH 2001

Feldmann, K.; Christoph, F.: *Maschinennahe Simulation - Anwendung in Maschinenentwicklung und -betrieb.* In: Panreck, K.; Dörrscheidt, F.: *Frontiers in Simulation.* Paderborn. Tagungsband 2001.

FELDMANN & CHRISTOPH 2000

Feldmann, K.; Christoph, F.: *Einsatz von Simulationswerkzeugen: Optimierung des thermischen und dynamischen Verhaltens von Bestückautomaten.* ZWF 95 (2000) 6, S. 308-312.

FELDMANN & SCHLÖGL 1999

Feldmann, K.; Schlögl, W.: *Integrated Modelling and Simulation of Manufacturing Systems – Exemplary in Electronic Production.* In: 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Leuven, Belgien. Tagungsband 1999, S. 369-378.

FELTEN 1974

Felten, K.: *Anwendung der Finite-Elemente-Methode für Berechnungen im Drehmaschinenbau.* Konstruktion 26 (1974), S. 8-14.

FINKE 1977

Finke, R.: *Berechnung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen*. RWTH Aachen: Dissertation 1977.

FÖLLINGER U. A. 1994

Föllinger, O.; Förrscheidt, F.; Klittich, M.: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 8. Aufl. Heidelberg: Hüthig 1994.

FRANK 2001

Frank, T.: *Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb*. Karlsruhe: wbk 2001. (Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe 105)

FREYMANN 2000

Freymann, R.: *Strukturdynamik für Maschinenbauer*. TU München: LBM 2000. (Skriptum zur Vorlesung)

GAO 2000

Gao, H.: *Erhöhung der dynamischen Bahngenauigkeit durch ganzheitliche Optimierung am Beispiel einer Linearmotorfräsmaschine*. Aachen: Shaker 2000. (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung)

GARCIA DE JALÓN & BAYO 1994

Garcia de Jalón, J; Bayo, E.: *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems*. New York: Springer 1994.

GAUSEMEIER 1997

Gausemeier, J.: *Mechatronik – mehr als nur ein neues Kunstwort*. Konstruktion 49 (1997) 3, S. 3.

GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000

Gausemeier, J.; Lückel, J.: *Entwicklungsumgebungen Mechatronik: Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme*. Paderborn: HNI 2000. (HNI-Verlagsschriftenreihe 80)

GAUSEMEIER U. A. 2000

Gausemeier, J.; Lindemann, U.; Reinhart, G.; Wiendahl, H.-P.: *Kooperatives Produktengineering: ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens*. Paderborn: HNI 2000. (HNI-Verlagsschriftenreihe 79)

GENDERKA 1995

Genderka, M.: *Objektorientierte Methode zur Entwicklung von Produktmodellen als Basis integrierter Ingenieursysteme*. Aachen: Shaker 1995. (Berichte aus der Konstruktionstechnik)

GERADIN U. A. 1994

Geradin, M.; Cardona, A.; Doan, D.B.; Duysens, J.: *Finite Element Modeling Concepts in Multibody Dynamics*. In: Pereira, M.F.O.S.; Ambrosio, J.A.C.: Computer Aided Analysis of Rigid and Flexible Mechanical Systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 1994.

GRABOWSKI U. A. 1991

Grabowski, H.; Anderl, R.; Pratt, M.J.: *Advanced Modelling for CAD/CAM Systems*. Berlin: Springer 1991. (Research Reports ESPRIT)

GRONBACH 1999

Gronbach, H.: *Simulationswerkzeug für die Gestaltung modularer CO₂-Laserbearbeitungsmaschinen*. Heimsheim: Jost-Jetter 1999. (ISW Forschung und Praxis 131)

GROß U. A. 2000

Groß, H.; Hamann, J.; Wiegärtner, G.: *Elektrische Vorschubantriebe in der Automatisierungstechnik: Grundlagen, Berechnung, Bemessung*. Erlangen: Publicis MCD 2000.

GROßMANN 2002

Großmann, K.: *Was ist, soll und kann die virtuelle Werkzeugmaschine?* In: 4. Dresdner WZM-Fachseminar: Was kann die virtuelle Werkzeugmaschine?, Dresden. Tagungsband 2002.

GROßMANN 2001

Großmann, K.: *Problemstellungen zu Dynamik und Genauigkeit an Vorschubantrieben*. In: 2. Dresdner WZM-Fachseminar: Dynamik und Genauigkeit der Vorschubantriebe, Dresden. Tagungsband 2001.

GROßMANN U. A. 1995

Großmann, K.; Schindler, J.; Schreiber, U.: *Simulation geregelter Werkzeugmaschinenantriebe*. In: Schwingungen in Antrieben: Analyse, Beurteilung, Beeinflussung, Überwachung, Veitshöchheim. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (VDI-Berichte 1220)

GÜLTING U. A. 1992

Güting, H.; Köhler, T.: *Concurrent Engineering: wissen, was der andere macht.* Markt & Technik (1992) 13, S. 72f.

HAHN 1999

Hahn, M.: *OMD - Ein Objektmodell für den Mechatronikentwurf.* Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

HAMANN U. A. 1993

Hamann, J.; Wiegärtner, G.; Tenefelde, B.: *Reduzierung der Torsionsschwingungen an Werkzeugmaschinen durch geeignete Wahl der mechanischen Übertragungselemente.* Antriebstechnik 32 (1993) 4, S. 75-85.

HARASHIMA U. A. 1995

Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T.: *Mechatronics - What is it, why and how?* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1995) 1, S. 1-4.

HEIMANN 1977

Heimann, A.: *Anwendung der Methode Finiter Elemente auf die Berechnung und Auslegung von Gestellbauteilen.* RWTH-Aachen: Diss. 1977.

HEIMANN U. A. 1998

Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: *Mechatronik: Komponenten – Methoden – Beispiele.* München: Carl-Hanser, 1998.

HEINEMANN 1998

Heinemann, G.: *Antriebs- und Maschinenauslegung für hochdynamische Werkzeugmaschinen.* In: Milberg, J.; Reinhart, G.: Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen: Mechatronische Maschinen effizient entwickeln, München. Utz 1998. (iwb Seminarberichte 41)

HEINEMANN & PAPIERNIK 1998

Heinemann, G.; Papiernik, W.: *Hochdynamische Vorschubantriebe für Linearmotoren.* VDI-Z Special Antriebstechnik (1998) 4, S. 26-33.

HEISEL & ESTEBAN 2002

Heisel, U.; Esteban, I.: *Development of a Modelling Tool for the Dynamic Optimized Design of Machine Tools with Parallel Kinematics.* Production Engineering IX (2002) 2, S. 85-88.

Literatur

HEISEL & ZIEGLER 2002

Heisel U.; Ziegler, F.: *Maschinentechnik für die Laserbearbeitung*. wt Werkstatttechnik (2002) 1.

HEISEL & ZIEGLER 2000

Heisel, U.; Ziegler, F.: *Sheet Metal Lightweight Design for Direct Driven Machine Tools*. Production Engineering VII (2000) 1, S. 73-76.

HEISEL & FEINAUER 1999

Heisel, U.; Feinauer, A.: *Dynamic Influence on Workpiece Quality in High Speed Milling*. Annals of the CIRP 48 (1999) 1, S. 321-324.

HEISEL U. A. 1996

Heisel, U.; Bach, P.; Chlebus, E.; Dybala, B.; Fried, M.; Izukowski, S.; Koch, J.; Repetzki, S.; Rudlof, B.; Sykora, P.; Talácko, J.; Weck, M.: *CAD- und FEM-Anwendung bei der Entwicklung von Gleitführungsbaugruppen: Europäische Zusammenarbeit im Rahmen des EU-Programms COPERNICUS*. wt-Produktion und Management 86 (1996), S. 50-56.

HENNING & KUTSCHA 1994

Henning, K.; Kutscha, S.: *Informatik im Maschinenbau*. 4. Aufl. Berlin: Springer 1994.

HIERSIG 1995

Hiersig H. M.: *Lexikon Ingenieurwissen - Grundlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

HOFFMANN 2001

Hoffmann, J.: *Matlab und Simulink*. München: Addison-Wesley 2001.

HÖHNE U. A. 1977

Höhne, G.; Zimmermann, K.; Kolev, E.: *Schwingungsberechnungen im konstruktiven Entwicklungsprozess*. Konstruktion 48 (1996), S. 313 - 318.

INDRAMAT 1999A

Indramat (Hrsg.): *Digitale AC-Motoren MKD: Projektierung*. Lohr am Main: Indramat 1999.

INDRAMAT 1999B

Indramat (Hrsg.): *DIAX04 Antrieb mit Servofunktion: Funktionsbeschreibung*. Lohr am Main: Indramat 1999.

ISERMANN U. A. 2002

Isermann, R.; Breuer, B.; Hartnagel, H. L.: *Mechatronische Systeme für den Maschinenbau: Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 241 "Integrierte mechanisch-elektronische Systeme für den Maschinenbau (IMES)*. Weinheim: Wiley-VCH 2002.

ISERMANN 1999

Isermann, R.: *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. Berlin: Springer 1999.

ISPAYLAR 1997

Ispaylar, M. H.: *Betriebseigenschaften von Profilschienen-Wälzführungen*. Würzburg: computTEAM 1997.

KALLENBACH 1997

Kallenbach, E.; Birli, O.; Saffert, E.; Schäffel, C.: *Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte*. In: *Mechatronik im Maschinen und Fahrzeugbau*, Moers. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997, S. 1-14. (VDI-Berichte 1315)

KALLMEYER 1998

Kallmeyer, F.: *Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme*. Paderborn: HNI 1998. (HNI-Verlags-schriftenreihe 42)

KELCH 1998

Kelch, M.: *Konzeption, Auswahl und Einführung von EDM/PDM-Systemen*. In: Milberg, J.; Reinhart, G.: *Engineering Data Management (EDM): Erfahrungsberichte und Trends*, Augsburg: Utz 1998, S. 27 - 65. (iwb Seminarberichte 31)

KETTERER 1995

Ketterer, G.: *Automatisierte Inbetriebnahme elektromechanischer, elastisch gekoppelter Bewegungssachsen*. Berlin: Springer 1995. (ISW Forschung und Praxis 108)

KIMMIG 2000

Kimmig, H.: *Standardisierung als Schlüssel zum Erfolg*. Konstruktion (2000) 10, S. 26.

KLEIN 2000

Klein, B.: *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode*. 4. Auflage. Braunschweig: Vieweg 2000.

KLINGEL 2000

Klingel, H.: *Ez/2-Innovationsverstärkung durch halbieren der Entwicklungszeit*. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung, Berlin. Tagungsband 2000, S. 3 - 14.

KNOTHE & WESSELS 1991

Knothe, K.; Wessels, H.: *Finite Elemente*. Berlin: Springer 1991.

KÖLSCH 1992

Kölsch G.: *Diskrete Optimierungsverfahren zur Lösung konstruktiver Problemstellungen im Werkzeugmaschinenbau*. RWTH Aachen: Dissertation 1992.

KOHRING 1993

Kohring, A.: *Systematisches Projektieren und Testen von Steuerungssoftware für Werkzeugmaschinen*. Aachen: Shaker 1993.

KOLLER 1994

Koller, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. 3. Auflage. Berlin: Springer 1994.

KRAUSE U. A. 2002

Krause, F.-L.: *Integrierte Virtuelle Produktentstehung (iViP)*. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: *integrierte Virtuelle Produktentstehung*: Abschlussbericht. München: Hanser 2002.

KRAUSE U. A. 2001

Krause, F.-L.; Baumann, R.; Jansen, H.; Kaumann, U.; Ziebeil, P.: *Integrierte Virtuelle Produktentstehung (iViP)*. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: *integrierte Virtuelle Produktentstehung*: Fortschrittsbericht April 2001. München: Hanser 2001.

KYURA & OHO 1996

Kyura, N.; Oho, H.: *Mechatronics – An Industrial Perspective*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 1, S. 10-15.

LINK 1997

Link, M.: *Updating local physical and global generalized parameters of coupled substructure models*. In: 15th int. modal analysis conference, Orlando, Florida. Proceedings 1997, S. 579 - 586.

LITZ 1979

Litz, L.: *Reduktion der Ordnung linearer Zustandsraummodelle mittels modaler Verfahren*. Stuttgart: Hochschul-Verlag, 1979. (Hochschulsammlung Ingenieurwissenschaft/Datenverarbeitung. 4)

LÜCKEL 2000

Lückel, J.: *Grundlagen der Regelungstechnik*. Uni Paderborn: MLaP 2000. (Skriptum zur Vorlesung)

LÜCKEL & WALLASCHEK 1997

Lückel, J.; Wallaschek, J.: *Functional modelling and simulation in mechanical design and mechatronics*. In: 2nd MATHMOD/IMACS Symposium Mathematical Modelling, Wien. Proceedings 1997.

LÜCKEL U. A. 2001

Lückel, J.; Ettingshausen, C.; Hestermeyer, T.; Schlautmann, P.: *Entwurfs- und Modellierungsstruktur der Mechatronik am Beispiel der Neuen Bahntechnik Paderborn*. In: 15. Symposium Simulationstechnik ASIM, Paderborn. Tagungsband 2001.

LÜCKEL U. A. 2000

Lückel, J.; Koch, T.; Schmitz, J.: *Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte*. In: Mechatronik - mechanisch-elektrische Antriebstechnik, Wiesloch. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000, S. 1-26. (VDI-Berichte 1533)

MASON 2002

Mason, H.: *ISO 10303 - STEP: A key standard for the global market*. ISO Bulletin (2002) 4, S. 9-13.

MATLAB 1996

N.N.: *SIMULINK - Dynamic systems simulation for MATLAB*. Dokumentation. The Mathworks Inc., 1996.

MECHASTEP 2002

MechaSTEP 2002: <<http://www.prostep.de/MechaSTEP>>

MEIER & KREUSCH 2000

Meier, H.; Kreusch, K.: *Virtuelle Maschinen für eine realistische Simulation*. wt Werkstattstechnik 90 (2000) 1/2, S. 19-21.

MEINLSCHMIDT & ZAMAZAL 1999

Meinlschmidt, J.; Zamazal, K.: *Werkzeuge zur FEM-Analyse*. In: Reinhart, G; Milberg, J.: *Virtuelle Produktion: Prozeß- und Produktsimulation*. München: Utz 1999, S. 17-32. (iwb Seminarberichte 47)

MEYERS 1999A

Meyers Lexikonred. (Hrsg.): *Meyers großes Taschenlexikon: in 25 Bänden*. Mannheim: B.I.-Taschenbuchverlag 1999. 7. Auflage (Band 5)

MEYERS 1999B

Meyers Lexikonred. (Hrsg.): *Meyers großes Taschenlexikon: in 25 Bänden*. Mannheim: B.I.-Taschenbuchverlag 1999. 7. Auflage (Band 11)

MEYERS 1999C

Meyers Lexikonred. (Hrsg.): *Meyers großes Taschenlexikon: in 25 Bänden*. Mannheim: B.I.-Taschenbuchverlag 1999. 7. Auflage (Band 14)

MICROSOFT 2002

Microsoft 2002: <http://msdn.microsoft.com/library/default.asp?url=/library/en-us/_ipc/dde_74px.asp>

MILBERG 1999

Milberg, J.: *Virtual Engineering - Leistungsfähige Systeme für die Produktentwicklung*. In: Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Weck, M.: *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven*, Aachen. Aachen: Shaker 1999, S. 141-167. (Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium)

MILBERG 1992

Milberg, J.: *Werkzeugmaschinen – Grundlagen: Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerung*. Berlin: Springer 1992.

MIU 1993

Miu, D.K.: *Mechatronics*. Berlin: Springer 1993.

MÜHL & MÜLLER 2002

Mühl, G.; Müller, C.M.: *Grundkonzept der iViP-Softwarearchitektur*. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: *integrierte Virtuelle Produktentstehung: Fortschrittsbericht II* März 2002. München: Hanser 2002, S. 11-22.

MÜLLER 1980

Müller, R.-D.: *Statische und dynamische Analyse von Werkzeugmaschinenantrieben und Zahnradgetrieben*. TU München: Diss. 1980.

NEBELING 1997

Nebeling, P. H.: *Abgleich der dynamischen Eigenschaften numerischer Modelle mit realen mechanischen Strukturen*. RWTH Aachen: Dissertation 1998.

OMG 2001

OMG 2001: <<http://www.omg.org>>

PETUELLI 1983

Petuelli, G.: *Theoretische und experimentelle Bestimmung der Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften normalbelasteter Fügestellen*. RWTH Aachen: Diss. 1983.

PAHL & BEITZ 1993

Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendungen*. 3. Aufl. Berlin: Springer 1993.

PAPIERNIK 1996

Papiernik, W.: *Struktur, Entwurf und Verhalten moderner CNC-Servoantriebe*. In: 7. Int. Fachmesse und Kongress für speicherprogrammierbare Steuerungen, Industrie PC's und elektrische Antriebstechnik, Sindelfingen. Tagungsband 1996, S. 397-417.

PARKIN & KALLENBACH 1997

parkin, R.M.; Kallenbach E.: *Control and configuration aspects of mechatronics: CCAM*. In: EFAM, Euro Conference in Focused Aspects of Mechatronics, Ilmenau. Tagungsband 1997, S. 21-26.

PASCUAL & GOLINVUAL 1998

Pascual, R.; Golinvual, J. N.: *Updating industrial models under a general optimization environment*. In: Proceedings of the 16th int. modal analysis conference. Santa Barbara, Kalifornien 1998, S. 1326 - 1332.

PASEWALDT 2001

Pasewaldt, B.: *Einführungsdokumentation PDM-Basisdienste (iViP, Teilprojekt 2.2)*. <<http://www.ivip.de/bscw/bscw.cgi/0/686274>> (10.12.2001)

PHILIPP 1992

Philipp, W.: *Regelung mechanisch steifer Direktantriebe für Werkzeugmaschinen*. Berlin: Springer 1992. (ISW Forschung und Praxis 92)

PRASETIO 1994

Prasario, J.: *Vorkorrektur der Sollbahn zur Erhöhung der Genauigkeit von CNC-Maschinen*. München: Hanser 1994. (Produktionstechnik - Berlin 148)

PRITSCHOW 1997

Pritschow, G.: *Angewandte Regelungstechnik in Produktionsanlagen*. Stuttgart: ISW 96/97. (Skriptum zur Vorlesung)

PRITSCHOW & FAHRBACH 1995

Pritschow, G.; Fahrbach, C.: *Direktantriebe für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. wt-Produktion und Management 85 (1995), S. 162-166.

PRITSCHOW U.A. 1999

Pritschow, G.; Schmid, J.; McCormac, S.E.: *Ein integriertes Simulationssystem für Werkzeugmaschinen und Roboter*. ZWF 94 (1999) 9, S. 546-549.

PÜHL 1999

Pühl, S.: *Engineering Object Management System: Ein Werkzeug zur Unterstützung der abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit*. Aachen: Shaker 1999. (Berichte aus der Produktionstechnik 24/99)

PÜTZ 1992

Pütz, J. (Hrsg.): *Einführung in die Elektronik*. Frankfurt: Fischer 1992.

RAKE 1994

Rake, H.: *Regelungstechnik A und Ergänzungen*. Aachen: IRT 1994. (Skriptum zur Vorlesung)

REINHART 2001

Reinhart, G.: *Werkzeugmaschinen I*. TU München: iwb 2001. (Skriptum zur Vorlesung)

REINHART 1999

Reinhart, G.: *Simulation - ein Experiment am digitalen Modell*. In: Feldmann, K.; Reinhart, G.: *Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion*. Berlin: Springer 2000, S. 13-30.

REINHART 1994

Reinhart, G.: *Wettbewerbsfähige Produktion – Voraussetzung für eine strategische Entscheidung*. In: Milberg, J.; Reinhart, G.: *Unsere Stärken stärken, Münchener Kolloquium '94*, München, Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1994, S. 186-211.

REINHART & FELDMANN 1997

Reinhart, G.; Feldmann, K.: *Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven*. München: Utz 1997.

REINHART & FUSCH 2001

Reinhart, G; Fusch, T.: *Marktplatz Virtuelle Produktion - Anforderungen an die Datenintegration in einem verteilten Umfeld*. In: Reinhart, G.: *Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen*, München: utz 2001, S. 8-2 - 8-15. (iwb Seminarberichte 57)

REINHART U. A. 2002

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Fusch, T.; Lanza, M.: *Rechnergestützte Produkt-, Prozess- und Anlagenentwicklung*. In: 6. Automobiltechnische Konferenz 2002, iViP-Abschlusskonferenz: Virtual Product Creation 2002, Berlin. Tagungsband 2002.

REINHART U. A. 2001A

Reinhart, G.; Oertli, T.; Zeller, W.: *Auslegung von NC-Antrieben unter Berücksichtigung strukturdynamischer und prozessbedingter Wechselwirkungen*. In: *Schwingungen in Antrieben 2001: Messung, Analyse, Beeinflussung, Überwachung*, Würzburg. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001, S. 187-207. (VDI-Berichte 1630)

REINHART U. A. 2001B

Reinhart, G.; Anton, O.; Lercher, B.: *Funktionsorientiertes Sichtenmodell für die Entwicklung mechatronischer Systeme: Interdisziplinäre Abhängigkeiten strukturieren und beherrschen*. VDI-Z 143 (2001) 11/12, S. 67 - 70.

REINHART U. A. 2001C

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Patron, C.: *Mit Simulation die Komplexität beherrschen: Aufgezeigt am Beispiel der dynamischen Simulation mechatronischer Systeme und des Einsatzes von Virtual Reality.* Industrie Management 17 (2001) 3, S. 34 - 37.

REINHART U. A. 2001D

Reinhart, G.; Egermeier, H.; Thieke, S.; Dürrschmidt, S.: *Mechatronik.* In: Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik. 2. Aufl. 7. Ergänzungslieferung 10/2001. Landsberg/Lech: ecomed 2001.

REINHART U. A. 2001E

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Patron, C.: *Die virtuelle Werkzeugmaschine - Neue Perspektiven im Werkzeugmaschinenbau.* In: X. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium 2001, Berlin. Tagungsband 2001, S. 187 - 191.

REINHART U. A. 2000

Reinhart, G.; Meinlschmidt, J.; Weißenberger, M.: *Optimierung von Werkzeugmaschinen am virtuellen Maschinenprototyp.* ZWF 95 (2000) 11.

REINHART U. A. 1999

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Ehrenstraßer, M.; Zeller, W.: *Steuerungstechnik ersetzt Hardware-Funktionalitäten.* WB Werkstatt und Betrieb 132 (1999) 12, S. 80-82.

REINHART U. A. 1998

Reinhart, G.; Schneider, C.; Weißenberger, M.; Sprenzel, A.; Meinlschmidt, J.: *Kooperative Entwicklung technologisch komplexer Produkte: Potentiale für den Werkzeugmaschinenbau.* Konstruktion 50 (1998) 9, S. 15 - 22.

REINHART U. A. 1997

Reinhart, G.; Weißenberger, M.; Sprenzel, A.; Meinlschmidt, J.; Wagner, P.: *Innovative Entwicklung von Werkzeugmaschinen – Methoden und Entwicklungswerkzeuge.* In: Ito, Y.; Moritz, E.F.: *Synergy of Culture and Production Vol. 1 – Holistic Approach to Machine Tool Innovation.* Sottrum: Artefact 1997.

RIECKMANN 2002

Rieckmann, W.: *Collaborative Design im Flugzeugbau*. In: Virtual Product Creation 2002: 6. Automobiltechnische Konferenz 2002: iViP Abschlusskonferenz, Berlin. Tagungsband 2002.

ROBERSON & SCHWERTASSEK 1988

Roberson, R. E.; Schwertassek, R.: *Dynamics of Multibody Systems*. Berlin: SPRINGER 1988.

RODDECK 1997

Roddeck, W.: *Einführung in die Mechatronik*. Stuttgart: Teubner 1997.

RODENACKER 1984

Rodenacker, W.G.: *Methodisches Konstruieren*. 3. Aufl. Berlin: Springer 1984.

ROGERSON 1997

Rogerson, D.: *Inside COM*. Redmond, Washington: Microsoft Press, 1997.

ROTH 1994

Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 1 Konstruktionslehre*. Berlin: Springer 1994.

RUDLOFF U. A. 1991

Rudloff, H.; Ketterer, G.; Fingberg, W.: *Hochgenaue Fräsbearbeitung. Der Einsatz von Zustandsreglern*. wt-Werkstattstechnik 81 (1991), S. 91-93.

SANFT 1995

Sanft, C.: *Entwicklung von Werkzeugmaschinen auf Basis eines integrierten Produktmodells*. München: Hanser 1995. (Produktionstechnik - Berlin 165)

SAUTER 1999

Sauter, J.: *Integrierte Topologie- und Gestaltoptimierung in der virtuellen Produktentstehung*. In: Deutsche MSC User Konferenz, Weimar 1999.

SAUTER & LAUBER 2000

Sauter, J.; Lauber, B.: *Innovative Produktentstehung durch den Einsatz von Topologie- und Gestaltoptimierungswerkzeugen im frühen Entwicklungsprozess*. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U.: Innovationsforum: Virtuelle Produktentstehung, Berlin 2000.

SCHLITTENHELM 1997

Schlittenhelm, K. M.: *Einsatz vorgefilterter Führungsgrößen für Bewegungssachsen zur Bahnerzeugung*. Berlin: Springer 1997. (ISW Forschung und Praxis 115)

SCHLÖGL 2000

Schlögl, W.: *Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung*. Bamberg: Meisenbach 2000. (Fertigungstechnik – Erlangen 101)

SCHMID 1972

Schmid, D.: *Numerische Bahnsteuerung. Beitrag zur Informationsverarbeitung und Lageregelung*. Berlin: Springer 1972. (ISW Forschung und Praxis 1)

SCHNEIDER 1998

Schneider, H.-J. (Hrsg.): *Lexikon Informatik und Datenverarbeitung*. 4. Aufl. München: Oldenbourg 1998.

SCHNEIDER 2000

Schneider, C.: *Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion*. München: Utz 2000. (Forschungsberichte iwb 144)

SCHÖTTNER 1999

Schöttner, J.: *Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie: Prinzip - Konzepte - Strategien*. München: Hanser 1999.

SCHULZ 1999

Schulz, H.: *Neuer Vorstoß in den Volumenmarkt*. WB Werkstatt und Betrieb 132 (1999) 12, S. 22f.

SCHWERTASSEK & WALLRAPP 1999

Schwertassek, R.; Wallrapp, O.: *Dynamik flexibler Mehrkörpersysteme*. Braunschweig: Vieweg 1999.

SHABANA 1994

Shabana, A.A.: *Computer Implementation of Flexible Multibody Equations*. In: Pereira, M.F.O.S.; Ambrosio, J.A.C.: Computer Aided Analysis of Rigid and Flexible Mechanical Systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 1994.

SIEMENS 2001

Siemens (Hrsg.): *Schneller zur Maschine - schneller auf den Markt: Mechatronic Support*.
<<http://www.ad.siemens.de/mc/de/indexe55f.html>> (2001)

SIEMENS 1998A

Siemens (Hrsg.): *SIMODRIVE Drehstrommotoren für Vorschub- und Hauptspindelantriebe - Funktionsbeschreibung*. Erlangen: Siemens 1998.

SIEMENS 1998

Siemens (Hrsg.): *Simodrive 611D/ Sinumerik 840D Antriebsfunktionen: Funktionsbeschreibung*. Erlangen: Siemens 1998.

SIMON 1986

Simon, W.: *Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen*. Berlin: Springer 1986. (iwb Forschungsberichte 5)

SPUR 1997

Spur, G.: *Auf dem Weg zur virtuellen Produktentwicklung*. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 92 (1997) 3.

SPUR & KRAUSE 1997

Spur, G.; Krause, F.-L.: *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. München: Hanser 1997.

SPUR & KRAUSE 1984

Spur, G.; Krause, F.-L.: *CAD-Technik: Lehr- und Arbeitsbuch für die Rechnerunterstützung in Konstruktion und Arbeitsplanung*. München: Hanser 1984.

SUMMER 1986

Summer, H.: *Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen*. Berlin: Springer 1986. (iwb Forschungsberichte 4)

TOMASZUNAS 1998

Tomaszunas, J.J.: *Komponentenbasierte Maschinenmodellierung zur Echtzeit-Simulation für den Steuerungstest*. München: Utz 1998. (Informationstechnik im Maschinenwesen)

TOMIZUKA 1987

Tomizuka, M.: *Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control*. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control 109 (1987), p. 65 - 68.

TÖNSHOFF U. A. 1998

Tönshoff, H. K.; Lapp, C.; Kaak, R.: *Control of Linear Direct Drives and New Demands on Machine Tool Structures*. Production Engineering 5 (1998) 2, S. 51-56.

TÖNSHOFF U. A. 1997

Tönshoff, H. K.; Brahms, U.; Aust, E.; Niemann, H.-R.: *Robotersteuerung für den Unterwassereinsatz*. wt Werkstattstechnik 87 (1997), S. 391-396.

VARGA 1994

Varga, A.: *Numerical Methods and Software Tools for Model Reduction*. In: 1st MATHMOD Conference, Wien. Proceedings 1994, S. 226-230.

VDI-RICHTLINIE 2221

VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1986.

VDI-RICHTLINIE 2223

VDI-Richtlinie 2223: *Begriffe und Bezeichnungen im Konstruktionsbereich*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1969.

VDI-RICHTLINIE 3633A

VDI-Richtlinie 3633, Blatt 8 (Arbeitsversion): *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Maschinennahe Simulation*. Stand: 2002

VDI-RICHTLINIE 3633B

VDI-Richtlinie 3633, Blatt 0 (Entwurf): *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Begriffsdefinitionen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

VDI-RICHTLINIE 3633C

VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen: Grundlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

WAHL 2000

Wahl, M.: *Methode zur Entwicklung kostengünstiger Werkzeugmaschinen*. Aachen: Shaker 2000. (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung)

WALKER 1987

Walker, B.: *Konfigurierbarer Funktionsblock Geometriedatenverarbeitung für Numerische Steuerungen*. Berlin: Springer 1987. (ISW Forschung und Praxis 68)

WALLASCHEK & KÜMMEL 1997

Wallaschek, J.; Kümmel, M.: *Mechatronik - Neue Impulse für die Produktentwicklung*. In: Gausemeier, J.: *TransMechatronik - Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik*, Paderborn. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 1997, S. 3-20. (HNI-Verlagsschriftenreihe 23)

WECK 1996

Weck, M.: *Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung*. 5. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (Studium und Praxis, Band 4)

WECK 1995

Weck, M.: *Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme: Automatisierung und Steuerungstechnik 2*. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (Studium und Praxis, Band 3.2)

WECK & BÜBENSCHÜTT 1995

Weck, M.; Büßenschütt, A.: *Application of basic shape concept to practical shape optimizatizion problems*. In: Proceedings of WCSMO, Goslar 1995.

WECK U. A. 2001

Weck, M.; Queins, M.; Brecher, C.: *Kopplung von Antriebs- und Strukturodynamiksimulation in Werkzeugmaschinen*. In: Schwingungen in Antrieben 2001: Messung, Analyse, Beeinflussung, Überwachung, Würzburg. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001, S. 167-186. (VDI-Berichte 1630)

WECK U. A. 2000

Weck, M.; Hessel, C.; Müller-Held, B.: *The Virtual Machine Tool*. Production Engineering 7 (2000) 2, S. 89-94.

WEIKERT 2000

Weikert, S.: *Beitrag zur Analyse des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen*. Zürich: IWF 2000. (Diss. ETH 13596)

WEIßENBERGER 2001

Weißberger, M.: *Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess*. München: Utz 2001. (iwb Forschungsberichte 166)

WISSERT 1996

Wissert, T.: *SINUMERIK 840D – Die NC-Steuerung mit integrierter Digitaler Antriebstechnik*. In: Pritschow, G.: *Moderne Regelungs- und Antriebstechnik: In Theorie und Praxis*, Stuttgart. Umdruck zum Seminar 1996.

WITEK 1977

Witek, A.: *Anwendung der Methode starrer finiter Elemente zur Bestimmung der dynamischen Charakteristiken des Balkens einer Fräsmaschine*. Maschinenbautechnik 26 (1977) 9, S. 410 - 412.

WUTTKE 2000

Wuttke, C. C.: *Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik*. Universität des Saarlandes: Dissertation 2000. (Schriftenreihe Produktionstechnik 20)

YE 1992

Ye, G.: *Erhöhung der Bahngenauigkeit NC-gesteuerter Vorschubachsen mit Hilfe eines Kompensationsfilters*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. (Fortschritt Berichte VDI Reihe 2 Nr. 255)

ZÄH 1995

Zäh, M.: *Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen*. Berlin: Springer 1995. (iwb Forschungsberichte 79)

ZÄH 1994

Zäh, M.: *A New Instability Mechanism in Milling and Circular Sawing Operations and Simulation in the Time and Frequency Domain*. In: ISMA 19: Tools for Noise and Vibration Analysis, Leuven, Belgium. Proceedings 1994, S. 1091-1102.

ZÄH & BAUDISCH 2003

Zäh, M.; Baudisch, T.: *Simulation Environment for Designing the Dynamic Motion Behaviour of the Mechatronic System Machine Tool*. Journal of Engineering Manufacture 217 (2003) 4.

ZÄH U. A. 2002

Zäh, M.; Angerer, M.; Schilp, J.; Zimmermann, J.: *Mechatronik - Innovationspotential der Produktion*. VDI-Z 144 (2002) 9/10, S. S4-S5.

ZELLER 2001

Zeller, W.: *Gesamtheitliches Sicherheitskonzept der Antriebs- und Steuerungstechnik für Werkzeugmaschinen*. München: Utz 2001. (iwb Forschungsberichte 161)

ZELLER 1997

Zeller, W.: *Ganzheitliche Optimierung lagegeregelter Vorschubantriebe*. VDI-Z Special Antriebstechnik (1997) 4, S. 52-56.

ZHOU U. A. 1996

Zhou, K.; Doyle, J.C.; Glover, K.: robust and Optimal Control. Upper Saddler River, New Jersey: Prentice-Hall 1996.

ZIRN 1996

Zirn, O.: *Beitrag zum Entwurf von Vorschubantrieben für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. Zürich: IWF 1996. (Diss. ETH 11676)

Anhang

1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Erfolgsfaktoren-Portfolio 65 deutscher Industrieunternehmen aus den Branchen Aggregatehersteller (7), Elektrogroßgeräte (10), Maschinenbauliche Anlagen (9), Produktionsmaschinen (24) und Zulieferer (15) (nach Gausemeier u. a. 2000, S. 108) .. 1
Abbildung 1-2: Der Simulationseinsatz im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen: eine Gegenüberstellung heute vs. zukünftig... 5
Abbildung 1-3: Die virtuelle Produktentwicklung heute..... 7
Abbildung 2-1: Vorgehensweise und Struktur der Arbeit 11
Abbildung 3-1: Prinzipielle Funktionsweise einer Werkzeugmaschine zur Erzeugung der Vorschubbewegung 14
Abbildung 3-2: Blockschaltbild der kaskadierten Lageregelung eines Vorschubantriebs (Vorsteuergrößen alternativ eingezeichnet "--") 15
Abbildung 3-3: Prinzipieller Aufbau der Antriebsmechanik eines Vorschubantriebs mit Spindel-Mutter-System (Reinhart 2001) 16
Abbildung 3-4: Die Werkzeugmaschine — ein komplexes mechatronisches System 19
Abbildung 3-5: Aufbau und Elemente eines Mehrkörpermodells..... 21
Abbildung 3-6: Blockorientierte Modellbildung elektrischer Zusammenhänge mit Hilfe einer CACE-Software 23
Abbildung 4-1: Einfaches Ersatzmodell für einen elektrischen Vorschubantrieb bestehend aus zwei Massen, die durch ein Feder-Dämpfer-System verbunden sind (J_1 : Trägheitsmoment Motorrotor, J_2 : Summe der auf den Motorrotor reduzierten Trägheitsmomente der Einzelmassen des Antriebsstranges, M_L : Lastmoment) 28
Abbildung 4-2: Mechanik eines Vorschubantriebssystems als sieben Massen System (J_1 : Istwertgeber Motorrotor, J_2 : Motorrotor mit Ritzel, J_3 : Rad + $\frac{1}{2}$ Spindellänge, J_4 : $\frac{1}{2}$ Spindellänge, J_5 : Spindel-mutter, J_6 : Tisch, J_7 : Messsystem)..... 29

Abbildung 4-3:	Auf 45 Kontenpunkte mit je 6 Freiheitsgraden diskretisiertes Modell eines Vorschubantriebs und Auszug aus dem Datensatz für das FEM-Programm ELFE_FE	30
Abbildung 5-1:	Simulationsmethodenspezifischer Modellbildungsprozess im Bereich der Mechanik	44
Abbildung 5-2:	Arbeitsschritte des FEM Modellbildungsprozesses	45
Abbildung 5-3:	Arbeitsschritte des MKS Modellbildungsprozesses.....	46
Abbildung 5-4:	Topologie-Diagramm eines MKS-Modells.....	47
Abbildung 5-5:	Prozesskette zur Ableitung der Daten für einen flexiblen Körper in der MKS aus den FEM-Daten.....	48
Abbildung 5-6:	Topologiediagramme unterschiedlicher mechanischer Sichten auf dasselbe reale System.....	50
Abbildung 5-7:	Mehrachmodellierung desselben Teilsystems in unterschiedlicher Software.....	54
Abbildung 5-8:	Neue Vorgehensweise beim Aufbau mechatronischer Simulationsmodelle für die Auslegung des NC-gesteuerten Bewegungsverhaltens von Werkzeugmaschinen	56
Abbildung 5-9:	Aufbau eines Mechatronik-Simulationsbausteins.....	58
Abbildung 5-10:	Konfiguration unterschiedlicher simulationsmethodenspezifischer Modelle aus den Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine ...	60
Abbildung 6-1:	Prinzipieller Aufbau des Mechatronik-Simulation Management Systems.....	62
Abbildung 6-2:	Der simulationsgestützte, iterative Optimierungsprozess	64
Abbildung 6-3:	Beispielhafte Verknüpfung der Datenbasis mit dem MS^2 -Bibliotheksmodul	66
Abbildung 6-4:	Vorgehensweise bei der Erzeugung eines neuen Datensatzes unter Verwendung des MS^2 -Bibliotheksmoduls	67
Abbildung 6-5:	Zusammenspiel zwischen Simulationsprojektmodul und Bibliotheksmodul	68
Abbildung 7-1:	Architektur der Simulationsumgebung	70
Abbildung 7-2:	Prinzip des PDM-basierten Datenmanagements	71

Abbildung 7-3: Zusammenspiel von Mechatronik-Simulation Management System und Datenebene	72
Abbildung 8-1: Nichtlinearitäten in der Mechanik.....	80
Abbildung 8-2: Ablauf der Bahnerzeugung ausgehend vom NC-Programm bis hin zur Ausgabe der Lagesollwerte	82
Abbildung 8-3: Aufbau eines Standard Werkzeugmaschinenvorschubantriebs	84
Abbildung 8-4: Durchgängige Modellbildung eines Linearführungssystems (Teil 1).....	86
Abbildung 8-5: Modellbildung eines Führungsschuhs in der FEM	87
Abbildung 8-6: Durchgängige Modellbildung eines Linearführungssystems (Teil 2).....	88
Abbildung 8-7: Durchgängige Modellbildung der Schnittstellen Kugelgewindespindel - Spindelmutter und Spindelmutter - Schlitten/Ständer.....	90
Abbildung 8-8: Durchgängige Modellbildung rotatorischer Lagerungen.....	92
Abbildung 8-9: Konfiguration eines Mechanik-Modells aus den mechanischen Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine (hier: MKS-Modell mit flexiblen Körpern)	94
Abbildung 8-10: Physikalisches Ersatzmodell und zugehöriges Blockschaltbild des permanenterregten Gleichstromnebenschlussmotors.....	96
Abbildung 8-11: Modell der kaskadierten Lageregelung	97
Abbildung 8-12: Modularer Aufbau einer Lageregelung für zwei NC-Achsen aus den vordefinierten Mechatronik-Simulationsbausteinen „Antrieb“ und „Servomotor“ (zum internen Aufbau der Mechatronik-Simulationsbausteine siehe 4. Kapitel im Anhang)	98
Abbildung 8-13: Konzepte zur Einbindung der Lagesollwerterzeugung in die Simulationsumgebung	100
Abbildung 8-14: VNCK mit emulierter Echtzeit.....	101
Abbildung 8-15: Gegenüberstellung von realer Echtzeit vs. virtueller Echtzeit	102
Abbildung 8-16: Applikationsebene der Simulationsumgebung: Simulationsmethodenspezifische Modelle und Beispiele für deren Verknüpfung zu mechatronischen Gesamtmodellen.....	105

Abbildung 8-17: Die Architektur der IT-Infrastruktur der Simulationsumgebung ...	108
Abbildung 8-18: Das Zeitmanagement der Laufzeitumgebung: Synchronisation der Einzelkomponenten der Simulationsumgebung.....	109
Abbildung 8-19: Synchrone vs. asynchrone Kommunikation.....	111
Abbildung 8-20: Architektur der Middleware der Laufzeitumgebung.....	112
Abbildung 8-21: Integration der iViP-Plattform in die Simulationsumgebung: Mechatronik-Simulation Management Systems als iViP-Client inner Frame Anwendung	114
Abbildung 8-22: Aufbau des Bibliotheksmoduls des Mechatronik-Simulation Management Systems.....	116
Abbildung 8-23: MS ² -Bibliotheksmodul: Ausschnitt aus der aufgabenbezogenen Präsentation der von einem Mechatronik-Simulationsbaustein verfügbaren Daten	117
Abbildung 8-24: Aufbau des Simulationsprojektmoduls des Mechatronik-Simulation Management Systems.....	118
Abbildung 8-25: Architektur der iViP PDM-Basisdienste (Quelle: Pasewaldt 2001, S. 3-10)	120
Abbildung 9-1: Drehbearbeitungszentrum (Quelle: Gildemeister Drehmaschinen GmbH)	121
Abbildung 9-2: Zeitplan für die Entwicklung des Dreh-Fräsbearbeitungszentrums	123
Abbildung 9-3: CAD-Modell des Dreh-Fräsbearbeitungszentrums.....	124
Abbildung 9-4: Durchgängige Modellbildung und Verwaltung des Mechatronik-Simulationsbausteins Schlitten Z1	126
Abbildung 9-5: Mechatronisches Gesamtmodell zur Untersuchung der NC-gesteuerten Bewegungsdynamik	127
Abbildung 9-6: Modell der Elektrokonstruktion bestehend aus dem parametrischen Antriebsmodell, dem parametrischen Modell des Servomotors (für Details siehe Anhang) und der Schnittstelle zur Mechanik (Co-Simulation-Block)	128
Abbildung 9-7: Mechanischer Aufbau des Vorschubantriebs der Z1-Achse	129

Abbildung 9-8: Topologie des Mehrkörpermodells zur Beschreibung der Bewegungsdynamik der in Abbildung 9-7 dargestellten Antriebsmechanik.....	130
Abbildung 9-9: MKS-Modell mit flexiblen Körpern: Deformation des Schlittens Z1, hervorgerufen durch eine Schwingung auf Grund des Eintauchens des Drehmeißels in das Werkstück.....	134
Abbildung 9-10: Kinematikmodell mit angekoppeltem VNCK.....	135
Abbildung 9-11: Gegenüberstellung von Nutzen und Aufwand der neuen Vorgehensweise.....	137

2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Übersicht über die Modellbildung der Mechanik im Bereich der Gesamtmaschinenmodelle	36
Tabelle 5-1: Überblick über die für die Modellbildung der Körper in den verschiedenen Programmen benötigten Daten (I nput) und deren Herkunft (O utput)	51
Tabelle 5-2: Übersicht über die Parameter, die für den Aufbau der simulationsmethodenspezifischen Gesamtmodelle benötigt werden.....	52
Tabelle 8-1: Klassische Aufgabenstellungen im Rahmen der Entwicklung von Werkzeugmaschinen in Bezug auf die Bewegungsdynamik; sortiert nach den Fachbereichen, in die die zugehörigen Komponenten fallen, und zugeordnet zu der Entwicklungsphase.....	78
Tabelle 8-2: Zuordnung der realen physikalischen Eigenschaften (Kapitel 8.1.1.1) zu Simulationsmethoden, die geeignet sind, diese entsprechend abzubilden.....	85
Tabelle 8-3: Übersicht über die zur durchgängigen Modellbildung der Schnittstellen Spindel - Spindelmutter und Spindelmutter - Schlitten/ Ständer erforderlichen Marker.....	91
Tabelle 8-4: Übersicht über die Schnittstellen der Mechatronik-Simulationsbausteine VNCK, Antrieb und Servomotor.....	104
Tabelle 9-1: Parameter zur Beschreibung des MKS-Modells der Antriebsmechanik aus Abbildung 9-8 (Richtungsangaben beziehen sich auf Abbildung 9-7)	133

3 Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Abkürzung	Bedeutung
3D-CAD	Dreidimensionales Computer Aided Design
CA-	Computer Aided
CACE	Computer Aided Control Engineering
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAx	Oberbegriff für Anwendungen im CAD-, CAE-Umfeld
COM	Component Object Model
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
CPU	Central Processing Unit
DCOM	Distributed Component Object Model
DDE	Dynamic Data Exchange
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMU	Digital Mock-Up
DOF	Degree of Freedom
DySimMo	Dynamic Simulation Modul
DTP	Desktop Publishing
E-CAD	Electrical Computer Aided Design
EDM	Engineering Data Management
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
FEM	Finite Elemente Methode
FRM	Frequency Response Mode
IGES	Initial Graphics Exchange Specification

Abkürzung	Bedeutung
IPO	Interpolator
ISO	International Standardisation Organization
IT	Informationstechnik
MKS	Mehrköpersimulation
MS ²	Mechatronik-Simulation Management System
MSB	Mechatronik-Simulationsbaustein
NC	Numerical Control
NCK	Numerical Control Kernel
PDM	Product Data Management
PLC	Programmable Logic Controller
SID	Standard Input Data
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
TCP	Tool Center Point
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VNCK	Virtual Numerical Control Kernel

4 Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
φ_{Motor}	Winkelstellung des Motorrotors	rad
Φ	magnetischer Fluss	Vs
c	Steifigkeit	N/m
d	Dämpfung	Ns/m
i_A	Ankerstrom	A
J_{Motor}	Massenträgheitsmoment des Motorrotors	kgm^2
J_{Fremd}	Auf die Motorwelle bezogenes Massenträgheitsmoment der Antriebsmechanik	kgm^2
K_E	Konstanter der elektrodynamischen Gegeninduktivität	Vs/rad
K_T	Drehmomentkonstante	Nm/A
K_V	Proportionalitätsverstärkung des Lagereglers einer NC-Achse mit konventioneller Kaskadenstruktur	N/min/mm, 1/s
L_A	Ankerinduktivität des Servomotors	H
M_{x_i}	Ist-Moment des Motorrotors der x-Achse	Nm
M_{x_s}	Soll-Moment des Motorrotors der x-Achse	Nm
M_B	Beschleunigungsmoment	Nm
M_{Motor}	Abtriebsmoment des Motors	Nm
M_W	Lastmoment an der Motorwelle	Nm
n	Drehzahl	U/min, rad/s
nM_{x_i}	Ist-Drehzahl des Motorrotors der x-Achse	U/min, rad/s
nS_{px_i}	Ist-Drehzahl der Kugelgewindespindel der x-Achse	U/min, rad/s

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
n_{Mx_s}	Soll-Drehzahl des Motorrotors der x-Achse	U/min, rad/s
n_{Spx_s}	Soll-Drehzahl der Kugelgewindespindel der x-Achse	U/min, rad/s
R_A	Ankerwiderstand des Servomotors	Ω
s	Weg	m
sx_i	Ist-Position des Schlittens der x-Achse	m
sx_s	Soll-Position des Schlittens der x-Achse	m
t	Zeit	s
T	Zykluszeit	s
T_{el}	elektrische Zeitkonstante des Servomotors	s
T_{IPO}	Interpolationstakt	s
u_A	Ankerspannung	V
u_{ind}	induzierte Gegenspannung	V
ux_i	Ist-Ankerspannung des Servomotors der x-Achse	V
ux_s	Soll-Ankerspannung des Servomotors der x-Achse	V
v	Geschwindigkeit	m/s
vx_i	Ist-Geschwindigkeit des Schlittens der x-Achse	m/s
vx_s	Soll-Geschwindigkeit des Schlittens der x-Achse	m/s
x	Position	m

5 Glossar

Concurrent Engineering

Im Gegensatz zum Simultaneous Engineering, bei dem der Entwicklungsprozess im Vordergrund steht, beschäftigt sich das Concurrent Engineering mit der Entwicklung von EDV-Systemen zur Unterstützung der parallelen Produktentwicklung (*Güting u. a. 1992*).

Durchgängigkeit

Durchgängigkeit bezeichnet die Wiederverwendbarkeit einmal generierter Daten bei der Modellbildung verschiedener Sichten sowie die Möglichkeit zur Kopplung von Modellen aus verschiedenen Fachabteilungen.

Echtzeitfähigkeit

Echtzeitfähigkeit bezeichnet die Eigenschaft eines Rechnersystems, innerhalb einer begrenzten, vorgegebenen Zeitspanne auf ein Ereignis reagieren zu können. Daraus resultieren hohe Anforderungen an die Hard- und Software.

Java

Java ist eine Programmiersprache zur Entwicklung von Applikationen, Applets usw. für das Internet. Java ist objektorientiert und plattformübergreifend. Prinzipiell ist jeder in Java programmierte elementare Baustein wiederverwendbar. In Erweiterung hierzu ist JavaBeans ein spezielles Konzept, das noch einige zusätzliche Regeln definiert, um die Wiederverwendbarkeit der in Java implementierten Komponenten zu erhöhen.

Emulation

Verfahren zur Anpassung von Programmen, die auf unterschiedlichen, nicht kompatiblen Anlagen laufen sollen. Dabei wird ein Teil oder eine Einheit eines Programms durch eine andere Einheit nachgebildet. Durch das Imitieren akzeptiert die Nachbildung die gleichen Daten, führt die gleichen Funktionen aus und wird von anderen Einheiten wie das Original erkannt.

Mechatronik-Simulationsbaustein

Ziel der mechatronischen Modellbildung ist eine hohe Modularität. Daher wird das mit Hilfe der Simulation zu analysierende Gesamtsystem in einzelne Komponenten zerlegt. Die Komponenten zeichnen sich durch eine feste Systemgrenze und Schnittstellen zu benachbarten Komponenten aus. Entsprechend der physikalischen Eigenschaften des realen Systems, das die Komponente repräsentiert, kann das physikalische Verhalten der Komponente mit Hilfe unterschiedlicher Simulationsmethoden beschrieben werden. Der Mechatronik-Simulationsbaustein ist die organisatorische Einheit, die alle hierbei anfallenden Daten verwaltet. Die Verwaltung erfolgt simulationsmethodenspezifisch in Form so genannter "Sichten". Die Sichten der Mechatronik-Simulationsbausteine sind damit die elementaren Einheiten der mechatronischen Modellbildung.

Middleware

Softwarelösung, die als Schnittstelle zwischen Anwendungsprogrammen unterschiedlicher Plattformen (Rechner und/oder Betriebssysteme) dient und so den Datenaustausch ermöglicht (*Krause u. a. 2002, S. 263*).

Sicht

Gesamtheit der Daten, die erforderlich ist, um das physikalische Verhalten eines Systems mit Hilfe einer Simulationsmethode beschreiben zu können.

Simultaneous Engineering

Simultaneous Engineering beschreibt die parallele Abarbeitung von Tätigkeiten zur Produkt- und Produktionsmittelkonzeption mit dem Ziel, die Entwicklungszeit zu verkürzen (*Eversheim 1999*).

Simulation

"Simulation ist ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind" (*VDI-Richtlinie 3633B*).

Tool Center Point

Wirkpunkt des Werkzeuges

Validierung

Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und realem System. Dabei gilt es zu prüfen, ob das Modell das reale physikalische Verhalten im Hinblick auf die Untersuchungsziele hinreichend genau und fehlerfrei widerspiegelt (*VDI-Richtlinie 3633B*).

Verifikation

Formale Überprüfung von Modellen, z. B. hinsichtlich Syntax, Konsistenz.

Virtuelle Produktentwicklung

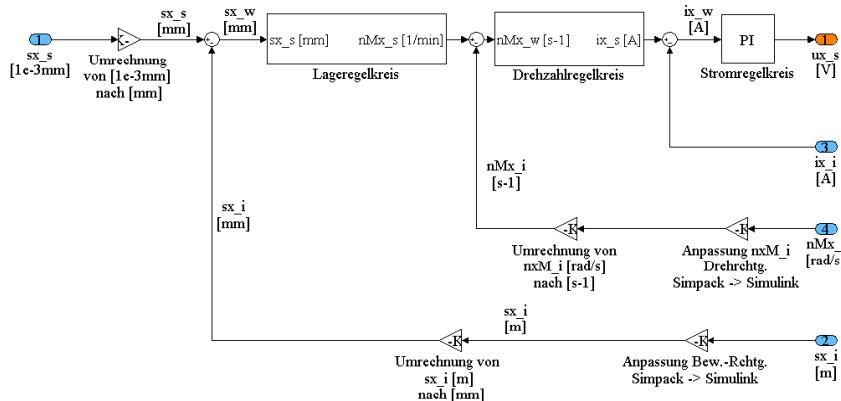
Virtuelle Produktentwicklung bezeichnet die durchgängige, entwicklungsbegleitende Planung, Evaluierung und Optimierung des Werkzeugmaschinenentwurfs an einem digitalen Modell (virtueller Prototyp) (*Reinhart & Fusch 2001, S. 8-2*)

Virtuelle Werkzeugmaschine

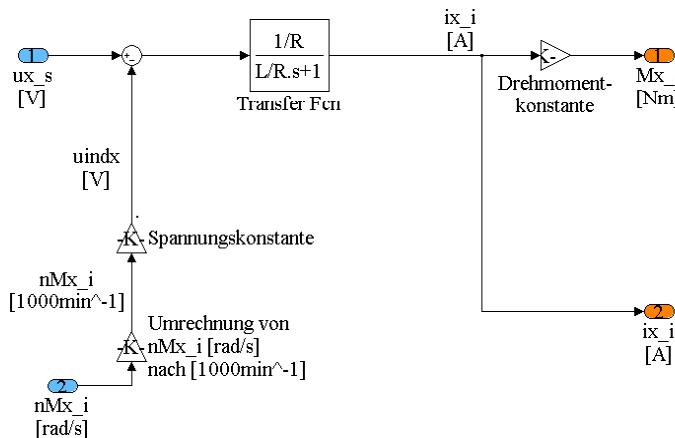
Die Gesamtheit aller Modelle, die mit Hilfe der Softwaretools der mechatronischen Produktentwicklung (3D-CAD, MKS, FEM, Kinematiksimulation, Elektro-CAD usw.) aufgebaut werden, wird als virtuelle Werkzeugmaschine bezeichnet (*Reinhart u. a. 2001E*).

6 Implementierungen der Mechatronik-Simulationsbausteine

6.1 Elektronische Sicht des Mechatronik-Simulationsbausteins "Antrieb"



6.2 Elektronische Sicht des Mechatronik-Simulationsbausteins "Servomotor"



iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | <i>Streifinger, E.</i>
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3 | 14 | <i>Groha, A.</i>
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8 |
| 2 | <i>Fuchsberger, A.</i>
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1 | 15 | <i>Riese, K.</i>
Klippsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6 |
| 3 | <i>Maier, C.</i>
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X | 16 | <i>Lutz, P.</i>
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3 |
| 4 | <i>Summer, H.</i>
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8 | 17 | <i>Klippel, C.</i>
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0 |
| 5 | <i>Simon, W.</i>
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9 | 18 | <i>Rascher, R.</i>
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9 |
| 6 | <i>Büchs, S.</i>
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7 | 19 | <i>Heusler, H.-J.</i>
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5 |
| 7 | <i>Hunzinger, I.</i>
Schneidereodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5 | 20 | <i>Kirchknopf, P.</i>
Ermittlung modularer Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3 |
| 8 | <i>Pilland, U.</i>
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2 | 21 | <i>Sauerer, Ch.</i>
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1 |
| 9 | <i>Barthelmeß, P.</i>
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2 | 22 | <i>Karstedt, K.</i>
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigung automatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7 |
| 10 | <i>Reithofer, N.</i>
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6 | 23 | <i>Peiker, St.</i>
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0 |
| 11 | <i>Diess, H.</i>
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5 | 24 | <i>Schugmann, R.</i>
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0 |
| 12 | <i>Reinhart, G.</i>
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1 | 25 | <i>Wible, P.</i>
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X |
| 13 | <i>Burstner, H.</i>
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6 | 26 | <i>Eibelhäuser, P.</i>
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinus anregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7 |
| 27 | <i>Prasch, J.</i>
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2 | | |

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

- 60 *Ströhmyer, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Gles, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stettler, R.*
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes
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 *Kummesteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionsystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 98 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 Produktionsystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationsystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *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 *Raith, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von Produktionsystemen 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 *Zwanziger, 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 Fertigungszelten
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionsysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutschle, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personorientierte Montageplanung für komplexe und 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 *Tunzner, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichttmiller, 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 Fielddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischetsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen 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 Ablaufsimulationsystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Käser, 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 *Löfler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermair, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgelenkte Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, 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, utz@utzverlag.com

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

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, 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, utz@utzverlag.de

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

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprenzel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 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
lieferbar ab ca. 09/01
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6

- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer
Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin 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 Roßeder
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7

- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6
- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinger
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4

