

O. Zirn  
S. Weikert

# Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme

Eine praxisnahe Einführung

 Springer

O. Zirn  
S. Weikert

# Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme

Eine praxisnahe Einführung



Springer

# Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme

Oliver Zirn    Sascha Weikert

---

# Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme

Eine praxisnahe Einführung

Mit 222 Abbildungen und 33 Tabellen

Professor Dr. Oliver Zirn  
FH Gießen-Friedberg  
FB Elektro- und Informationstechnik  
Wiesenstraße 14  
35390 Gießen, Deutschland  
e-mail: oliver.zirn@ei.fh-giessen.de

Dr. Sascha Weikert  
ETH Zürich  
Institut Werkzeugmaschinen und Fertigung  
Tannenstraße 3  
8092 Zürich, Schweiz  
e-mail: weikert@iwf.mavt.ethz.ch

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.

ISBN-10 3-540-25817-5 Springer Berlin Heidelberg New York  
ISBN-13 978-3-540-25817-9 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

[springer.de](http://springer.de)

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006  
Printed in Germany

MATLAB® and Simulink® are trademarks of The MathWorks, Inc. and are used with permission. The MathWorks does not warrant the accuracy of the text or exercises in this book. This book use or discussion of MATLAB® and Simulink® software or related products does not constitute endorsement or sponsorship by MathWorks of a particular pedagogical approach or particular use of the MATLAB® and Simulink® software.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satz und Herstellung: LE-TeXJelonek, Schmidt und Vöckler GbR, Leipzig  
Einbandgestaltung: medionet AG, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier 7/3141/YL - 5 4 3 2 1 0

# Vorwort

## Hintergrund

Fertigungseinrichtungen auf der Basis von Werkzeugmaschinen und Robotern sind die Schlüsselkomponenten moderner Fertigungstechnik und unterliegen einem steten Produktivitätsdruck. Die Entwicklung immer leistungsfähigerer Komponenten – Antriebe, Steuerungen, Führungen, Getriebe – sowie neuer Materialien und Fertigungsverfahren ermöglichen heute den Bau von Fertigungssystemen mit gleichzeitig hoher Präzision und hoher Steifigkeit bei immer weiter gesteigerten Geschwindigkeiten. Die mitteleuropäischen Werkzeugmaschinen- und Roboterhersteller nehmen hier eine weltweite Spitzenstellung ein. Besonders die Entwicklung von Direktantrieben und neue kinematische Maschinenkonzepte haben die Entwicklung von Fertigungssystemen im vergangenen Jahrzehnt stark beeinflusst. Zugleich haben sich die Anforderungen an die Ingenieure, die mit der Weiterentwicklung dieser Maschinen befasst sind, grundlegend geändert.

Beherrschten vor zehn Jahren noch weitgehend die maschinenbaulich geprägten Konstrukteure mit großem Erfahrungswissen die Werkzeugmaschinenentwicklung, so erfordert heute der Betrieb vieler Anlagen an der physikalisch-technischen Machbarkeitsgrenze eine enge Abstimmung zwischen Antriebs- und Steuerungstechnik sowie dem mechanischen Anlagenentwurf. Obgleich mechatronische Systeme in der Mikrosystemtechnik oder der Automobilindustrie ebenso anspruchsvolle Anwendungen erfordern, kann der Werkzeugmaschinenbau heute mit einigem Recht als die „Mechatronische Königsdisziplin“ gelten.

Blickt man in die Belegschaften der Maschinenhersteller, so fällt das geringe Durchschnittsalter der Entwicklungsingenieure auf. Der erhebliche Abbau – vor allem von erfahrenen älteren Ingenieuren – in den 1990-er Jahren und die zwischenzeitliche Erholung in dieser Branche hat einen erheblichen Bedarf an Entwicklungsingenieuren der Fachrichtungen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik erzeugt.

An den fertigungstechnischen Instituten und Transfereinrichtungen der mitteleuropäischen Hochschulen wird der Stand der Technik durch anwendungsnahe Forschung beständig vorangetrieben. Durch die Ausbildung einer großen Zahl junger anwendungsorientierter Ingenieurwissenschaftler,

die anschließend meist in der mittelständischen Werkzeugmaschinenindustrie aktiv sind, leisten die Universitäten einen wesentlichen Beitrag zur Bereitstellung von Fachkräften mit den benötigten hohen analytischen Fähigkeiten.

Leider muss man feststellen, dass vor allem promovierte Entwicklungsingenieure nach wenigen Jahren in Managementfunktionen vorrücken und somit ihre an den Instituten geschulten analytisch-wissenschaftlichen Fähigkeiten nur noch in geringem Maße in die Produktentwicklung einbringen. Damit stellen praxisnah ausgebildete Ingenieure von Fachhochschulen und Berufsakademien weiterhin das Rückgrat der Entwicklung und Applikation von Fertigungseinrichtungen dar. Dieses Buch wendet sich vor allem an diese praktisch tätigen Ingenieure. Es zeigt auf, wo auch mit begrenzter theoretischer Tiefe und unter den Zeitrestriktionen der Praxis mit Hilfe der Modellbildung und Simulation wichtige Systemeigenschaften von Neuentwicklungen vorausberechnet und bestehende Systeme gezielt optimiert werden können.

Die Fähigkeit zur Modellbildung ist als analytische Mindestanforderung zur Vermeidung ruinöser „Trial and Error“-Vorgehensweisen anzusehen. Im Bereich der mechanischen Konstruktion ist die Finite-Elemente-(FE-) Berechnung mittlerweile fest etabliert. Die gekoppelte Simulation von geregelten Antrieben mit FE-Modellen der Maschinenstruktur bleibt mittelfristig aufgrund erheblicher Rechenzeiten und der erforderlichen Ressourcen zur Bedienung der komplexen Werkzeuge noch unwirtschaftlich. Somit sind Simulationen auf der Basis vereinfachter Starrkörpermodelle oder aus der FE-Analyse abgeleiteter Strukturmodelle eine wertvolle und kostengünstige Ergänzung zu Prototypentests. Beispielhaft wird hier das Simulationswerkzeug MATLAB/Simulink<sup>®</sup> behandelt, das in Industrie und Hochschulen stark verbreitet und mit vertretbarem Einarbeitungsaufwand handhabbar ist.

## **Leserkreis**

Die Voraussetzungen und Ideen für dieses Buch resultieren aus der projektbezogenen wissenschaftlichen Arbeit der Autoren an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich mit verschiedenen namhaften Maschinen- und Antriebsherstellern und den Erfahrungen in der Lehre auf wissenschaftlichem sowie fachhochschulspezifisch anwendungsnahem Niveau an verschiedenen Hochschulen und Fortbildungseinrichtungen.

Dieses Buch soll dem praxisnahen Ingenieur als Einführung und Anleitung dienen, moderne Methoden und Werkzeuge unter den Bedingungen der betrieblichen Praxis effizient einzusetzen. Dabei stellt der Beitrag kein mechatronisches Lehrbuch dar, sondern schlägt die Brücke zwischen der

klassischen Grundlagenliteratur und den Produktbeschreibungen der Komponenten einer Werkzeugmaschine.

## **Aufbau**

Im ersten Kap. werden die Grundlagen zur Beschreibung mechatronischer Systeme und die Vorgehensweise bei der Modellbildung dargestellt. Sie sollen dem Praktiker zur Erweiterung bzw. Auffrischung der im Studium erworbenen Grundlagen dienen. Anhand eines Tauchspulmotors werden diese Grundlagen verdeutlicht. Dieses einfache Beispiel wurde bewusst gewählt, da es noch eine analytische Beschreibung zulässt, aber bereits alle wesentlichen Komponenten einer Servoachse enthält. Leser mit tiefen Kenntnissen der Regelungstechnik und der systemtheoretischen Grundlagen können dieses Kap. überspringen.

Im zweiten Kap. werden die zentralen Komponenten zum Aufbau von Fertigungseinrichtungen modelliert. Daraus resultiert eine Modellbibliothek – ohne jedoch den Anspruch der Vollständigkeit zu erheben. Vielmehr soll der Leser durch die Herleitung der einzelnen Komponentenmodelle eine Basis bekommen, von der aus er die geeignete Modellierung für seine Anwendungsfelder ableiten kann.

Im dritten Kap. werden die heute verfügbaren Simulationswerkzeuge dargestellt und eine Einführung in die Implementierung von Werkzeugmaschinenmodellen in MATLAB®/Simulink® gegeben. Die Anwendung auf verschiedene Beispiele zeigt den Umgang mit dem Simulationswerkzeug auf und soll als Hilfestellung zur Einarbeitung dienen. Leser mit Erfahrungen im Umgang mit MATLAB/Simulink können dieses Kap. überspringen.

Eine zentrale Fragestellung ist die Abschätzung der erreichbaren Leistungsfähigkeit im Entwurfsstadium einer Neuentwicklung. Hierzu steht aus Zeit- und Kapazitätsgründen nicht immer die rechnergestützte Simulation zur Verfügung. Daher werden im vierten Kap. vereinfachte Modelle hergeleitet und einfache „Handformeln“ angegeben, mit denen die Einstellparameter an Vorschubachsen schnell abgeschätzt werden können.

Das fünfte Kap. befasst sich mit der Modellbildung und Simulation realisierter Werkzeugmaschinen. Dabei wurde bewusst eine sehr umfangreiche Darstellung gewählt, um mit diesen Beispielen eine effiziente Einarbeitung in unterschiedliche Schwierigkeitsgrade zu ermöglichen.

## **Danksagung**

Die Autoren danken dem Vorsteher des Institutes für Werkzeugmaschinen und Fertigung der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Herrn



Prof. Dr. Konrad Wegener für die aktive Unterstützung dieses Buches und die vielfältigen Anregungen sowie den Mitarbeitern des IWF, Herrn Dr. Fredy Kuster, Herrn Dr. Wolfgang Knapp, Herrn Dipl.-Ing. ETH Michael Hadorn, Herrn Dr. Zdzislaw Rak und Herrn Dipl.-Ing. ETH Sergio Bissoni für die Diskussionsbereitschaft und viele Hilfestellungen. Herrn Dipl.-Ing (FH) Tobias Schöller, Rückle GmbH, D-Römerstein sowie der Tschudin AG, CH-Grenchen und der Mikron SA, CH-Agno gilt der besondere Dank für die zur Verfügung gestellten Beispiele und die Unterstützung der messtechnischen Untersuchungen für dieses Buch. Herrn Dr. Gerhard Kehl, Heller GmbH, D-Nürtingen, sei für die Anregungen und umfangreichen Diskussionen zur FE-Integration in die dynamische Simulation gedankt.

Wertvolle Anregungen zur Robotik lieferte Herr Prof. Dr. W. Weber vom Robotik-Zentrum der FH Darmstadt. Den Kollegen und Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Mechatronik der FH Gießen-Friedberg, Herrn Prof. Dr. Uwe Probst, Herrn Prof. Dr. Klaus Wüst, Herrn Prof. Dr. Dieter Koerth, Herrn Werner Kutsche, Herrn Werner Bergen, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Axel Hoos, Frau Dipl.-Ing. (FH) Annett Monat sowie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Michael Claus sei für die engagierte Mitarbeit im Rahmen der zur Entstehung dieses Buches beitragenden Projekte gedankt.

Unser Dank gilt zuletzt der Lektorin des Verlages, Frau Eva Hestermann-Beyerle, für den Anstoß zur Entstehung dieses Buches und die engagierte Unterstützung der Konzeptionsphase.

Besonders danken wir unseren Ehepartnerinnen, Frau Dr. Birgit Zirn und Frau Dr. Claudia Scheer, für ihr liebevolles Verständnis während der absorbierten Wochenenden und so manchen Motivationsschub für die termingerechte Fertigstellung des Manuskriptes.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Grundlagen zur Beschreibung mechatronischer Systeme .....</b>	<b>4</b>
1.1.1	Beschreibung im Zeitbereich .....	5
1.1.2	Beschreibung im Frequenzbereich.....	15
1.1.3	Zeitdiskrete Systeme.....	24
<b>1.2</b>	<b>Modellbildung mechatronischer Systeme .....</b>	<b>32</b>
1.2.1	Modellbildungssystematik .....	34
1.2.2	Identifikation .....	46
1.2.3	Validierung .....	51
<b>1.3</b>	<b>Analogiebetrachtungen .....</b>	<b>52</b>
<b>2</b>	<b>Modellbildung .....</b>	<b>59</b>
<b>2.1</b>	<b>Elektrische Servoantriebe .....</b>	<b>61</b>
2.1.1	Elektro-mechanisches Modell.....	61
2.1.2	Thermisches Modell .....	71
<b>2.2</b>	<b>Mechanische Übertragungsglieder .....</b>	<b>84</b>
<b>2.3</b>	<b>Achsbezogenes Strukturmodell .....</b>	<b>93</b>
<b>2.4</b>	<b>Steuerung und Führungsgrößengenerierung .....</b>	<b>104</b>
<b>2.5</b>	<b>Kinetische Kopplung von Achsfreiheitsgraden .....</b>	<b>111</b>
2.5.1	Ebene Kinematik .....	117
2.5.2	Räumliche Kinematik .....	124
2.5.3	Erweiterungen und Anwendbarkeitsgrenzen .....	140
<b>2.6</b>	<b>Maschinenbezogenes Strukturmodell .....</b>	<b>143</b>
2.6.1	Formalismus zur räumlichen Starrkörpermodellierung .....	147
2.6.2	Aufbau des gesamten Maschinenmodells .....	153
2.6.3	Transformationen.....	170
2.6.4	Auswertung der Strukturmodelle .....	174
2.6.5	Verfeinerung der Strukturmodellierung.....	182
<b>2.7</b>	<b>Modellbildungsbeispiel direktangetriebene Rundachse .....</b>	<b>183</b>
2.7.1	Elektro-mechanisches Modell.....	185
2.7.2	Thermisches Modell .....	188
<b>2.8</b>	<b>Modellbildungsbeispiel Schleifmaschine.....</b>	<b>196</b>

<b>3</b>	<b>Simulation.....</b>	<b>205</b>
3.1	<b>Simulationswerkzeuge.....</b>	<b>206</b>
3.1.1	Rechnergestützte Simulation dynamischer Systeme.....	207
3.1.2	Software-Werkzeuge .....	212
3.2	<b>Einführung in MATLAB®/Simulink® .....</b>	<b>213</b>
3.2.1	Basisfunktionen in MATLAB .....	215
3.2.2	Script-Dateien und Funktionen.....	217
3.2.3	Blockschaltbilder mit Simulink .....	219
3.2.4	Kurzübersicht MATLAB/Simulink .....	224
3.3	<b>MATLAB®/Simulink® für Fortgeschrittene.....</b>	<b>225</b>
3.3.1	Toolboxen.....	225
3.3.2	Echtzeitsimulation .....	229
3.3.3	Kombination mit weiteren Softwarewerkzeugen.....	230
3.4	<b>Simulationsbeispiel Tauchspulmotor .....</b>	<b>231</b>
3.4.1	Implementierung.....	232
3.4.2	Validierung .....	240
3.5	<b>Simulationsbeispiel direktangetriebene Rundachse .....</b>	<b>247</b>
3.5.1	Elektro-mechanisches Modell .....	247
3.5.2	Thermisches Modell .....	252
3.6	<b>Simulationsbeispiel Schleifmaschine.....</b>	<b>258</b>
<b>4</b>	<b>Regelung von Servoantrieben .....</b>	<b>265</b>
3.1	<b>Stromregler .....</b>	<b>267</b>
3.2	<b>Geschwindigkeitsregler .....</b>	<b>271</b>
3.2.1	Elastizitäten im Geschwindigkeitsregelkreis .....	272
3.2.2	Dämpfungsoptimale Reglereinstellung.....	276
3.3	<b>Lageregelung.....</b>	<b>285</b>
3.3.1	Lageregelverstärkung .....	285
3.3.2	Vorsteuerung .....	287
3.3.3	Störübertragungsverhalten.....	289
3.4	<b>Quantisierungseffekte und Filtereinstellungen .....</b>	<b>292</b>
3.4.1	Inkrementelle Positionserfassung .....	293
3.4.2	Drehzahlollwertfilter.....	296
3.4.3	Stromollwertfilter.....	297
3.5	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>299</b>
<b>5</b>	<b>Beispiele aus der industriellen Praxis .....</b>	<b>303</b>
3.1	<b>Direktangetriebene Dreh-Schwenkeinheit.....</b>	<b>303</b>
3.2	<b>Fräsmaschine .....</b>	<b>314</b>
3.3	<b>Parallelkinematik.....</b>	<b>324</b>

<b>Anhang.....</b>	<b>339</b>
<b>Anhang A.....</b>	<b>339</b>
<b>Anhang B.....</b>	<b>340</b>
B1    Führungsgrößengenerator für eine Positioniersteuerung ....	340
B2    Führungsgrößengenerator für eine Bahnsteuerung .....	342
B3    MATLAB-Programme der Führungsgrößengeneratoren....	347
<b>Anhang C.....</b>	<b>353</b>
 <b>Literatur.....</b>	 <b>357</b>

# 1 Einführung

Die Entwicklung von Werkzeugmaschinen und Robotern ist ein faszinierendes Aufgabenfeld, in dem das Zusammenwirken von Ingenieuren aus den Bereichen Maschinenbau, Informatik und Elektrotechnik die zentrale Rolle spielt. Alle Beteiligten benötigen dazu eine ausreichende Basis mechanischen Wissens.

Die Wettbewerbssituation ist in den automatisierungs- und fertigungstechnischen Branchen heute sehr angespannt. Die weitgehend erfahrungsbasierte Entwicklung der Vergangenheit mit umfangreichen Prototypen- und Nullserientests ist unter den aktuellen Restriktionen bezüglich Entwicklungszeit und -kosten nicht mehr möglich. Die Erstinbetriebnahme einer neuen Maschine beim Kunden ersetzt heute oft herstellerinterne Prototypentests – eine verhängnisvolle Entwicklung, die zu hektischen „Feuerwehrrübungen“, finanziellen Verlusten und einem schwindenden Vertrauen der Kunden bzw. Anwender führt.

Aktuelle Beispiele hierzu sind die um die Jahrtausendwende entwickelten direkt angetriebenen Werkzeugmaschinen. Ihre Produktivität war in weit geringerem Maße gestiegen, als es die Forschungsergebnisse der Werkzeugmaschineninstitute in Mitteleuropa aus den 90er Jahren und die Werbung der Antriebshersteller erwarten ließ. Die Gründe hierfür werden in diesem Buch ausführlich erläutert und mögliche Abhilfen aufgezeigt. Zudem wiesen die ersten ausgelieferten Maschinen aufgrund mangelnder elektrischer Abstimmung der Antriebsketten erhebliche Ausfallwahrscheinlichkeiten auf. Dies hat neben teils verheerenden Auswirkungen auf die Bilanz der Werkzeugmaschinenhersteller zu einem erheblichen Vertrauensverlust der Anwender in diese Technik geführt, die eigentlich als zuverlässiger und produktiver eingeschätzt wurde.

Die rechnergestützte Simulation bietet einen viel versprechenden Ausweg aus dieser unbefriedigenden Situation. Der Vorteil der Simulation ist in anderen Branchen (Luft- und Raumfahrt, Mikrosystemtechnik, Fahrzeugtechnik) inzwischen unbestritten. In den dort tätigen großen Unternehmen konnte die Simulation von den personell gut ausgestatteten Berechnungsabteilungen eingeführt und betrieben werden. Dennoch gab es Ende der 90er Jahre auch hier Rückschläge (unzureichende Stabilität vorwiegend simulativ entwickelter und kaum getesteter Fahrwerke in Grenzsituationen – Stichwort „Elchtest“). Heute besitzt man in diesen Bereichen eine sehr

ausgereifte Vorstellung vom Sinn und Nutzen der Simulation und validiert die Ergebnisse an wenigen, jedoch aussagekräftigen Prototypentests.

Für Werkzeugmaschinen und Roboter wurden in den vergangenen Jahren an verschiedenen Forschungsinstituten erhebliche Anstrengungen unternommen, um die dynamischen Eigenschaften der Maschinenstruktur unter Einbindung der Regelung der Achsantriebe und der Prozesslasten gekoppelt zu simulieren (Berkemer 2002, Großmann et al. 2004, Denkena et al. 2005). Aufgrund der hohen Aufwendungen für die Werkzeuge und die hohen Anforderungen an die ausführenden Berechnungsingenieure sind diese Simulationsmethoden noch nicht – oder nur in sehr großen Unternehmen mit entsprechenden Simulationsgruppen – umgesetzt (Kehl 2004). Die meisten der Roboter- und Werkzeugmaschinenhersteller sind mittelständisch geprägte Unternehmen. Hier muss die mechatronische Simulation als Zusatzaufgabe vom Antriebsspezialisten, dem Projektleiter oder dem Konstrukteur bearbeitet werden. Vielfach werden Berechnungsaufgaben auch von externen Dienstleistern bearbeitet (z.B. Finite-Elemente-Analyse, Antriebsauslegung). Um mittelfristig mechatronische Kompetenz im Unternehmen bilden und erweitern zu können, sollte die Berechnung und Simulation jedoch soweit wie möglich von den internen Entwicklungsingenieuren wahrgenommen werden. Nur so ist sichergestellt, dass die Erfahrungen aus dem praktischen Betrieb dauerhaft in die Verbesserung der Modelle und Berechnungsmethoden einfließen.

Dazu sind Simulationswerkzeuge und Modellbildungsmethoden erforderlich, die unter den gegebenen Zeitrestriktionen eingesetzt werden können. Das Ziel dieses Buches ist daher die anwendernahe Einführung in die Modellbildung und Simulation von Werkzeugmaschinen und Robotern für ein mittelständisches Umfeld.

Dabei wird gezeigt, wie durch Mehrkörpermodelle (anstelle von bzw. abgeleitet aus FE-Analysen) die wesentlichen Eigenschaften ausreichend genau nachgebildet werden können. Diese Mehrkörpermodelle sind mit dem heute weit verbreiteten und vergleichsweise leicht zu handhabenden Simulationswerkzeug MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> implementier- und analysierbar. Dabei können die hier dargestellten Modelle und Beispiele nicht umfassend sein, sondern stellen vielmehr eine Modellbibliothek für Werkzeugmaschinen, Roboter und deren wichtigste Komponenten dar, die die Einarbeitung und das Verständnis für die Zusammenhänge erleichtern und entsprechend der aktuellen Aufgabenstellung zu einem effizienten Werkzeug zusammengesetzt werden können.

Speziell für die Konzeptphase von Fertigungseinrichtungen, wenn neben Lastenheft und wenigen Handskizzen keine weiteren Details der zukünftigen Maschine – und schon gar keine CAD-Daten, wie sie für die FEM erforderlich sind – bekannt sind, bieten die hier eingeführten Starrkörpermodelle

die Möglichkeit, schnell Aussagen zur Leistungsfähigkeit und zu den Grenzen der Maschine zu erhalten.

Abbildung 1.1 zeigt die Modellbildungsschritte vom realen System über das physikalische Modell zu einem implementierten mathematischen Modell am Beispiel einer Werkzeugmaschine auf. Das in einem Simulationswerkzeug implementierte Modell erlaubt die Simulation interessierender Systemeigenschaften, wie zum Beispiel die Bahn des Werkstückes im Vergleich zur Sollbahn.

Bei aller nutzbringenden Umsetzung der Modellbildung zur Simulation von Systemeigenschaften sei ein großer, jedoch schwer quantifizierbarer Vorteil gesondert hervorgehoben:

Ein Ingenieur, der in der Lage ist, sein Produkt ausreichend genau zu modellieren, gewinnt damit ein sehr hohes Systemverständnis. Damit wird

**Originalsystem:**

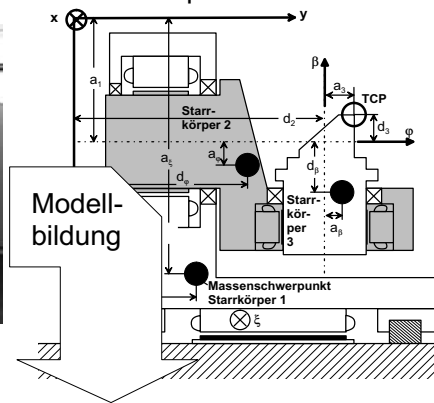
z.B. Dreh-/Schwenkachse



Messung

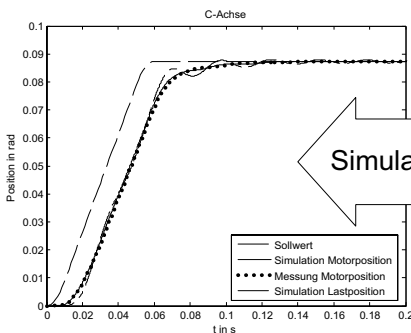
**Physikalisches Modell:**

z.B. Starrkörpermodell



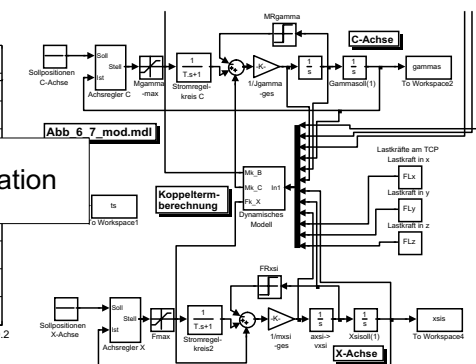
**Systemverhalten:**

z.B. Bahngenaugigkeit



**Mathematisches Modell:**

z.B. Simulink-Blockschaltbild



**Abb. 1.1.** Modellbildung und Simulation