Georg Rill | Thomas Schaeffer

Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation

Georg Rill | Thomas Schaeffer

Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation

mit Anwendungsbeispielen

Mit 73 Abbildungen

STUDIUM

VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Prof. Dr.-Ing. Georg Rill brachte 1978 den Studiengang Maschinenbau an der TU München zum Abschluss und promovierte 1983 mit dem Thema „Instationäre Fahrzeugschwingungen bei stochastischer Erregung“ am Institut B für Mechanik der Universität Stuttgart. Danach war er 4 Jahre bei der Daimler-Benz AG, Stuttgart-Untertürkheim tätig, bevor er 1987 Professor an der Hochschule Regensburg mit den Lehrgebieten Technische Mechanik, Festigkeitslehre, Ingenieurinformatik, Fahrdynamik, Mehrkörperdynamik sowie Laborleiter Fahrdynamik wurde und bis heute ist. Während seiner Tätigkeit nahm er weltweit an zahlreichen Forschungsaufenthalten u. a. bei Daimler-Benz und der Ford AG und Gastprofessuren teil.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer brachte den Studiengang Maschinenbau 1991 an der Universität Siegen zum Abschluss und promovierte 1998 mit dem Thema „Systematisches Lösen von Führungsbewegungsaufgaben“. Von 1991 bis 1998 war er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion der Universität Siegen und bis 2003 Entwicklungsingenieur bei der Heidelberg Druckmaschinen AG in der Abteilung Getriebetechnik und Simulation. Danach leitete er das Fachgebiet Getriebetechnik bei der Heidelberg Druckmaschinen AG, bevor er 2004 Professor an der Hochschule Regensburg mit den Lehrgebieten Konstruktion, CAD, Maschinenelemente und Getriebetechnik, Technische Mechanik, Mehrkörpersysteme und Bewegungstechnik sowie Laborleiter Mehrkörpersysteme wurde und bis heute ist.

1. Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010

Lektorat: Thomas Zipsner | Ellen Klabunde

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0888-2

Vorwort

Nachdem in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts in den Industrieunternehmen CAD-Systeme im Bereich der Produktentwicklung Einzug gehalten haben, sind in diesem Umfeld viele weitere rechnergestützte Systeme entstanden, die mittlerweile den kompletten Produktlebenszyklus abdecken. So ist es heute auch bei kleineren Unternehmen Stand der Technik, dass hoch belastete Bauteile hinsichtlich ihrer Verformung und Beanspruchung mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) berechnet werden. Der immerwährende Wunsch nach kürzeren Entwicklungszeiten bei gleichzeitiger Kostenreduzierung und Qualitätssteigerung besteht nach wie vor. Deshalb versucht man unter dem Stichwort „Virtuelle Produktentwicklung“ das Verhalten eines Produktes, einer Maschine im Vorfeld ohne aufwändige und zum Teil langwierige Versuche mit teuren realen Prototypen nur durch Simulationen mit virtuellen Prototypen vorherzusagen. Bezüglich des mechanischen Bewegungsverhaltens von technischen Systemen – in fast allen Maschinen bewegt sich mindestens ein Bauteil – werden seit Jahrzehnten in der Automobilindustrie und einigen Hightech-Branchen so genannte Mehrkörpersimulations-Programme eingesetzt. MKS-Programme helfen die notwendigen Bewegungsgleichungen aufzubauen, führen die Simulationsrechnungen durch und stellen die Ergebnisse animiert oder in Form von Diagrammen dar. Sie erlauben es, das Bewegungsverhalten der Bauteile zu simulieren und so die Funktion vorab zu überprüfen. Gleichzeitig lassen sich damit auch die Belastungen der Bauteile berechnen, die gerade für deren optimale Auslegung zwingend notwendig sind. Leider war der Einsatz bis vor wenigen Jahren mit sehr hohen Hard- und Softwarekosten verbunden. Die Rahmenbedingungen haben sich geändert: die Hardwarekosten sind drastisch gesunken, weil die Leistungsfähigkeit normaler PCs für solche Untersuchungen mittlerweile vollkommen ausreichend ist. Auch die Software ist leistungsfähiger und vor allen Dingen auch bedienerfreundlicher geworden. Dies zeigt sich auch in der zunehmenden Integration von MKS-Programmteilen in die CAD-Umgebung eines Konstruktionsarbeitsplatzes.

Dieses Lehrbuch entstand aus den Unterlagen zur Vorlesung Mehrkörperdynamik im Masterstudiengang Maschinenbau an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Regensburg, die erstmalig im Wintersemester

2007/2008 durchgeführt wurde. Aufbauend auf grundlegende Kenntnisse in der Technischen Mechanik und in einer Programmiersprache werden die Methoden der Mehrkörperdynamik vermittelt. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden bei der praktischen Anwendung werden durch einfache, aber dennoch genügend komplexe Beispiele erläutert. Analog zu dem Lehrbuch von Nikravesh (Nik07), das sich ausschließlich mit der ebenen Mehrkörperdynamik beschäftigt, werden auch hier Matlab-Skripte und -Funktionen in den Text integriert. Sie verdeutlichen die einzelnen Methoden und geben einen Eindruck in den Aufwand und die Problematik bei der Umsetzung der Theorie innerhalb von Simulationsprogrammen. Die in Matlab verwendete objektorientierte Programmiersprache ermöglicht eine kompakte und nahezu selbsterklärende Umsetzung der mathematischen Beziehungen in entsprechende Programmanweisungen. Zahlreiche Grafiken geben einen Eindruck in das dynamische Verhalten von Mehrkörpersystemen. Dieses Buch vermittelt einen vertieften Einblick in die Mehrkörperdynamik. Die Modellbildung, die mathematische Beschreibung und die numerische Simulation von Systemen starrer Körper bilden dabei die Schwerpunkte. Die Modellierung von Kontakten und die mathematische Beschreibung elastischer Körper sowie deren Einbindung in ein Mehrkörpersystem können dagegen nur beispielartig erläutert werden. Das Buch soll dem anspruchsvollen Studierenden in mathematisch naturwissenschaftlichen Studiengängen und dem praxisnahen Anwender kommerzieller Programme zur Simulation von Mehrkörpersystemen in die Lage versetzen, bei der Modellierung komplexer Systeme die Vorteile der jeweiligen Methodik auszunutzen und die Nachteile zu vermeiden.

Die Autoren danken dem Verlag Vieweg+Teubner für die angenehme Zusammenarbeit und insbesondere Herrn Thomas Zipsner aus dem Lehrstuhl Maschinenbau, der nach Durchsicht des Vorlesungs-Manuskripts mit wertvollen Anregungen zum Gelingen dieses Lehrbuchs beigetragen hat.

Regensburg, im August 2010

Georg Rill und
Thomas Schaeffer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Historie und Anwendungsgebiete	1
1.2	Elemente der Mehrkörperdynamik	2
2	Dynamik des starren Körpers	3
2.1	Lagebeschreibung	3
2.2	Geschwindigkeitszustand	14
2.3	Bewegungsgleichungen	21
3	Starre Körper mit elastischen Verbindungselementen	29
3.1	Elastische Verbindungselemente	29
3.2	Beispiele	36
3.3	Integrationsverfahren	44
4	Starre Körper mit kinematischen Bindungen	53
4.1	Beispiel: Rollende Münze	53
4.2	Methoden und Prinzipie	61
4.3	Rekursiver Algorithmus	83
4.4	Differential-Algebraische Gleichungen	99
4.5	Konsequenzen	117
5	Analyse von Mehrkörpersystemen	119
5.1	Gleichgewicht	119
5.2	Eigendynamik	125
5.3	Fremderregung	129
5.4	Optimierung	135
5.5	Inverse Kinematik	138
5.6	Inverse Dynamik	143
6	Elastische Körper	147
6.1	Einleitung	147
6.2	Beispiel Hubschrauber-Rotorblatt	148
6.3	Einbindung Finiten Elemente	173

7 Anwendungsbeispiel aus der Fahrzeugtechnik	175
7.1 Motivation	175
7.2 Aufbau einer McPherson-Achse	176
7.3 Analytische Beschreibung	178
7.4 ADAMS-Modell	191
7.5 SIMPACK-Modell	200
7.6 Modellerweiterungen	203
Literaturverzeichnis	205
Abbildungsverzeichnis	209
Tabellenverzeichnis	211
Sachwortverzeichnis	213