Einführung in die Mechatronik

Werner Roddeck

Einführung in die Mechatronik

5., überarbeitete und erweiterte Auflage

Springer Vieweg

Werner Roddeck
Hochschule Bochum
Bochum, Deutschland

ISBN 978-3-658-15843-9
DOI 10.1007/978-3-658-15844-6

ISBN 978-3-658-15844-6 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1997, 2003, 2006, 2012, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Strasse 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Der Begriff Mechatronik (engl. mechatronics) ist ein Kunstwort und wurde vor ca. 45 Jahren in Japan von einem Entwickler aus dem Bereich der Robotertechnik geprägt. Er setzt sich aus den beiden Namen der bekannten Disziplinen der Ingenieurwissenschaften - Mechanik oder Maschinenwesen (engl. mechanics) und Elektronik (engl. electronics) - zusammen. In den letzten 25 Jahren ist er auch in Deutschland sehr verbreitet worden und vor 23 Jahren wurde der erste Studiengang in Deutschland mit dem Abschluss „Dipl.-Ing. Mechatronik“ an der Hochschule Bochum eröffnet. Diesem Beispiel sind inzwischen viele Hochschulen gefolgt, indem sie Studiengänge „Mechatronik“ oder Studienrichtungen mit entsprechenden Studienanteilen einrichteten. Seit vielen Jahren ist der „Mechatroniker“ auch ein anerkannter Ausbildungsberuf, was die Nachfrage der Fachdisziplin „Mechatronik“ in der Industrie dokumentiert.

Die Notwendigkeit für diese neue Disziplin der Ingenieurwissenschaften ergibt sich aus der immer weiter zunehmenden Durchdringung maschinenbaulicher Produkte mit Anteilen aus dem Bereich der Elektrotechnik und der Informatik. Dabei werden nicht nur einzelne Komponenten konventioneller Produkte ersetzt, sondern die Entwicklung folgt einem ganz neuen Denkansatz. Man versucht, das Gesamtsystem zu verstehen und zu modellieren und wählt dann für die verschiedenen Teilsysteme solche Komponenten und Methoden aus, die zu einfacheren, preiswerteren und funktionaleren Gesamtsystemen führen. Dies ist nur dann möglich, wenn Produktentwickler fachübergreifende Kenntnisse aus allen genannten Bereichen der Ingenieurwissenschaften besitzen. Im Prinzip sind alle Methoden und Komponenten, die in der Mechatronik eingesetzt werden, als Teilgebiete anderer Ingenieurdisziplinen bereits bekannt und es gibt darüber umfangreiche Spezialliteratur. Bei Erscheinen der 1. Auflage dieses Buches fehlte jedoch eine Gesamtschau der Mechatronik, die die Teilgebiete in einen Zusammenhang setzte. Diese Lücke will das vorliegende Buch schließen und ist dabei so gestaltet, dass es von vielen Technikern und Ingenieuren sowohl im Studium, als auch in der Berufspraxis verwendet werden kann. Es behandelt das Thema beginnend mit den erforderlichen Analyse- und Synthesemethoden von Systemen, über die Beschreibung einsetzbarer Systemkomponenten bis zur Darstellung ausgeführter Beispiele für mechatronische Systeme.

Das zu Beginn der Hochschulausbildung etablierte Curriculum der Mechatronik hat sich im Laufe der letzten 20 Jahre gewandelt. So bestand es zu Beginn noch aus einer Zusammenstellung bereits bekannter Teilgebiete aus Maschinenbau und Elektrotechnik, von denen man annahm, dass die „Mechatronik“ durch Zusammenschau der Teilgebiete in den Köpfen der Studierenden entstehen würde. Da Nomenklatur und Regelwerke in den genannten Wissenschaftsgebieten aber sehr heterogen sind, trat das nicht selbstverständlich ein. Folgerichtig sind zwischenzeitlich Studienfächer ins Curriculum aufgenommen worden, die auch den Begriff „Mechatronik“ im Namen führen und in denen versucht wird, die Stoffintegration zum Bestandteil der Ausbildung zu machen.

Leider fehlt noch immer ein gemeinsamer Leitgedanke, der zu mehr Vereinheitlichung der Teilgebiete führen könnte. Mit zu den wichtigsten Fachgebieten der Me-

chatronik gehören die Modellbildung und Simulation von Systemen. Ich hatte bereits in der 1. Auflage dieses Buches vor 20 Jahren die objektorientierte Modellbildung als einen wichtigen, die Teilgebiete integrierenden Aspekt berücksichtigt. Leider standen zu diesem Zeitpunkt noch keine eingeführten und einfach einsetzbaren Software-Tools zur Verfügung. Heute hat sich das geändert und inzwischen hat die Methodik der Modellierung von mechatronischen Systemen mit Bondgraphen einen Stand erreicht, der es erlaubt, diese Methodik als die gesuchte Klammer für eine Homogenisierung der sehr heterogenen Teilgebiete anzusehen. Es stehen nun auch Programmsysteme und Literatur zur Verfügung, die den Umgang mit dieser Methodik sehr einfach machen. Im Hinblick darauf ist in dieser Auflage die Modellbildung mit Bondgraphen umfassender behandelt worden.

Da die Mechatronik ein sehr umfangreiches Wissensgebiet umspannt, können natürlich im Rahmen eines solchen Buches nicht alle Grundlagen behandelt werden. So sollten dem Leser mathematische Methoden wie die Differential-, Integral- und Matrizenrechnung bekannt sein. Ebenso sind grundlegende Kenntnisse der Physik in den Bereichen Mechanik und Elektrotechnik erforderlich. Aufgrund der Stofffülle können manche Themen nur angerissen werden, so dass der Leser im Bedarfsfall das entsprechende Wissen anhand der angeführten Literatur vertiefen muss.

Die behandelte Themenstellung erstreckt sich über viele Fachgebiete. Daher kann ich natürlich nicht Spezialist für jedes einzelne Thema sein. Ich bitte deshalb schon jetzt die Fachleute einzelner Fachgebiete, denen die Darstellung ihres Spezialgebietes zu kurz oder zu oberflächlich erscheint, um Nachsicht, da ich zugunsten der Gesamtschau an einigen Stellen Kompromisse eingehen musste.

Das Buch wendet sich an Studierende der Ingenieurwissenschaften mit Mechatronik als Studienschwerpunkt an Hochschulen, Berufsakademien und Universitäten, sowie an Ingenieure in der Praxis.

Im Übrigen bin ich den Kollegen, Mitarbeitern und Studierenden an der Hochschule Bochum dankbar, die mich mit Anregungen, Beispielen und Material zu bestimmten Themen unterstützt haben. Durch die Diskussion mit ihnen und durch die gemeinschaftliche Weiterentwicklung mechatronischer Studiengänge an der Hochschule Bochum konnte auch diese 5. Auflage gegenüber den Vorgängern noch klarer strukturiert, aktualisiert und den Erfordernissen eines Mechatronik-Studiums angepasst werden.

Meiner Frau Renate, die mir durch Ihre Unterstützung die Zeit für die Fertigstellung dieses Buches freimachte, bin ich zu großem Dank verpflichtet. Herrn Thomas Zipsner vom Springer Vieweg Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit und die Anregungen zur Weiterentwicklung des Buches.

Witten, August 2016

Werner Roddeck

Inhalt

1	Einleitung	
1.1	Entwicklung von Maschinenbau und Elektrotechnik	1
1.2	Entwicklung der Technik am Beispiel der Werkzeugmaschine	4
1.3	Mechatronik als neues Bindeglied	6
1.4	Maschinenbau und Elektrotechnik - grundsätzlich verschieden?	8
1.5	Unterschiede zwischen Maschinenbau, Elektrotechnik und Mechatronik	16
1.6	Teilgebiete der Mechatronik	21
2	Modellbildung technischer Systeme	25
2.1	Systembegriff	25
2.2	Verfahren der Modellbildung	28
2.2.1	Theoretische Modellbildung	30
2.2.1.1	Allgemein bekannte Modellvorstellungen	30
2.2.1.2	Vorgehensweise bei der Modellbildung	31
2.3	Klassifizierung dynamischer Systeme	38
2.4	Modellierung von Geometrie und Körpereigenschaften	41
2.4.1	Mehrkörpersysteme	41
2.4.2	Systeme mit elastischen Elementen	43
2.5	Modellierung elektrischer Komponenten	45
3	Dynamik mechanischer Systeme	50
3.1	Kinematik des Massenpunktes	50
3.2	Kinematik des starren Körpers	53
3.2.1	Die ebene Bewegung des starren Körpers	53
3.2.2	Die ebene Relativbewegung eines Punktes	59
3.2.3	Die Bewegung des starren Körpers im Raum	61
3.2.3.1	Rotation im Raum	62
3.2.3.2	Relativbewegung eines Punktes des starren Körpers	64
3.2.3.3	Darstellung der Bewegung des starren Körpers in Matrizenschreibweise	66
3.3	Bindungen in Mehrkörpersystemen	77
3.4	Kinetik	88
3.4.1	Impuls-, Schwerpunkt- und Drallsatz	88
3.4.2	Energiesatz	97
3.4.3	Die Prinzipien der Mechanik	100
3.4.3.1	Prinzip der virtuellen Arbeit	100
3.4.3.2	Lagrange'sche Bewegungsgleichungen	105
4	Schwingungen	112
4.1	Einmassenschwinger	112
4.1.1	Freie ungedämpfte Schwingungen	114
4.1.2	Freie gedämpfte Schwingungen	116
4.1.3	Erzwungene Schwingungen	120
4.1.3.1	Nichtperiodische Erregung	121
4.1.3.2	Harmonische Erregung	122
4.1.4	Nichtlineare Schwinger	128
4.2	Mehrmassenschwinger	130
4.3	Schwingungsanalyse	138
4.3.1	Reelle Form der Fourier-Reihe	140
4.3.2	Komplexe Form der Fourier-Reihe	144
4.3.3	Fourier-Transformation nichtperiodischer Funktionen	146
4.3.4	Diskrete Fourier-Transformation zur Analyse von Abtastsignalen	148

5	Sensoren	157
5.1	Messtechnik	160
5.1.1	Messgrößen und Maßeinheiten	160
5.1.2	Messgrößenaufnehmer und Messwertwandler	162
5.1.2.1	Messwertanpassung	164
5.1.2.2	Analog-/Digital-Wandler	167
5.1.3	Kenngößen von Messeinrichtungen	169
5.1.3.1	Statische Kenngößen	169
5.1.3.2	Dynamische Kenngößen	171
5.1.3.3	Fehlerkenngößen	173
5.2	Messeffekte	177
5.2.1	Widerstandseffekte	180
5.2.1.1	Ohmsche Widerstandseffekte	180
5.2.1.2	Piezowiderstandseffekt	183
5.2.2	Magnetische Effekte	184
5.2.2.1	Induktionsprinzip	184
5.2.2.2	Galvanomagnetische Effekte	185
5.2.2.3	Magnetoelastische Effekte	187
5.2.3	Kapazitive Effekte	188
5.2.4	Piezo- und Pyroelektrische Effekte	189
5.2.5	Optische Effekte	190
5.3	Sensoren für mechatronische Systeme	193
5.3.1	Bewegungssensoren	194
5.3.1.1	Positionssensoren	194
5.3.1.2	Geschwindigkeitssensoren	204
5.3.1.3	Beschleunigungssensoren	206
5.3.2	Kraft- und Momentensensoren	209
6	Aktoren	212
6.1	Klassische Aktoren	214
6.1.1	Elektromotorische, rotierende Antriebe	214
6.1.1.1	Gleichstrommotoren	216
6.1.1.2	Drehfeldmotoren	227
6.1.1.3	Asynchronmotoren	229
6.1.1.4	Schrittmotoren	234
6.1.2	Elektromotorische Linearantriebe	236
6.1.3	Fluidische Aktoren	238
6.1.3.1	Pneumatische Aktoren	238
6.1.3.2	Hydraulische Aktoren	239
6.1.3.3	Geschwindigkeitsverstellung von hydraulischen Aktoren	242
6.2	Neuartige Aktoren	248
6.2.1	Piezoelektrische Aktoren	250
6.2.2	Aktoren aus Formgedächtnislegierungen	253
6.2.3	Dehnstoffaktoren	256
6.2.4	Mikrostrukturierte Aktoren	257
7	Automatisierungstechnik	260
7.1	Automatisierungskonzepte	260
7.1.1	Intelligente Maschinen	262
7.1.2	Steuerung und Regelung	264
7.1.3	Schlussfolgern und regelbasiertes Wissen	266
7.1.4	Autonome intelligente Agenten	267
7.1.5	Lernen und Mustererkennung	268
7.1.6	Architektur intelligenter Maschinen	269
7.1.6.1	Hierarchien	270
7.1.6.2	Netzwerke	271

7.1.6.3	Schichtarchitekturen	277
7.2	Steuerungstechnik	278
7.2.1	Boole'sche Algebra	281
7.2.1.1	Kombinatorische Steuerungen	285
7.2.1.2	Sequentielle Steuerungen	288
7.2.2	Probleme der Modellbildung digitaler Systeme	291
7.2.3	Mehrwertige und unscharfe Logik (Fuzzy Logic)	294
7.2.4	Neuronale Netzwerke	299
7.2.4.1	McCulloch-Pitts-Neuron	301
7.2.4.2	Perceptron	302
7.2.4.3	Backpropagation-Netzwerk	305
7.3	Regelungstechnik	307
7.3.1	Beschreibung und Analyse regelungstechnischer Systeme	308
7.3.1.1	Laplace-Transformation	310
7.3.1.2	Blockschaltbilder	318
7.3.1.3	Frequenzgang und Ortskurve	324
7.3.1.4	Verschiedenartige Übertragungssysteme	327
7.3.1.5	Frequenzkennlinien	333
7.3.1.6	Zustandsraumdarstellung	340
7.3.1.7	Regler	345
7.3.1.8	Stabilität von Regelkreisen	352
7.3.1.9	Systemidentifikation	365
7.3.2	Synthese von Regelkreisen	370
7.3.2.1	Spezifikationen	371
7.3.2.2	Einstellregeln	373
7.3.2.3	Mehrschleifige Regelkreise	376
7.4	Prozessdatenverarbeitung mit Mikrorechnern	380
7.4.1	Mikrorechner	381
7.4.1.1	Aufbau von Mikrorechnern	382
7.4.1.2	Software für Mikrorechner	392
7.4.2	Anwendungsspezifische Prozessoren und Bauelemente	393
8	Simulation	397
8.1	Numerische Integration	399
8.2	Modellbildung mit Bondgraphen	407
8.2.1	Elemente von Bondgraphen	408
8.2.2	1-Port Bauelemente	412
8.2.2.1	1-Port R-Elemente	412
8.2.2.2	1-Port C-Elemente	413
8.2.2.3	1-Port I-Elemente	414
8.2.2.4	1-Port Quellen	415
8.2.3	2-Port Bauelemente	416
8.2.3.1	2-Port Transformer	416
8.2.3.2	2-Port Gyrator	417
8.2.4	Multi-Ports	418
8.2.5	Erstellung von Modellen komplexerer Systeme	420
8.3	Simulationssysteme	422
8.3.1	Simulationssprachen	422
8.3.2	Simulation elektrischer Schaltungen	423
8.3.3	Simulation mechanischer Systeme	424
8.3.4	Modellbeschreibung mit Blockschaltbild-Editoren	425
8.3.5	Objektorientierte Modellbildung	430
8.3.5.1	20-Sim	431
8.3.5.2	CAMel-View	436
8.3.6	Hardware-in-the-Loop, Software-in-the-Loop	438
8.3.6.1	Hardware-in-the-Loop	439
8.3.6.2	Software-in-the-Loop	439

8.3.6.3	Kopplung von Modellen und Prototypen	439
8.3.7	Simulationssysteme für Industrieroboter	440
9	Mechatronische Systeme	443
9.1	Wann ist der Einsatz der Mechatronik sinnvoll?	443
9.2	Entwicklung mechatronischer Systeme	446
9.3	Mechatronische Teilsysteme	455
9.3.1	Magnetlager	456
9.3.2	Anti-Blockier-System (ABS)	461
9.3.3	Aktives Fahrwerk	463
9.3.3.1	Aktive Federung mit Hydrozylinder	465
9.3.3.2	Aktive Federung mit Hydrozylinder und aktivem Tilger	466
9.3.4	Mechatronische Anwendungen bei Industrierobotern	470
9.3.4.1	Nachführen eines Roboterarms an einer Freiformfläche	471
9.3.4.2	Zusätzliche Bewegungsachsen für Industrieroboter	476
9.4	Mechatronische Gesamtsysteme	483
9.4.1	Hexapodenkonzepte	483
9.4.2	Fahrrad mit aktiver Neigetechnik	486
	Literaturverzeichnis	493
	Sachwortverzeichnis	497