

Bodo Heimann  
Amos Albert  
Tobias Ortmaier  
Lutz Rissing

# Mechatronik

Komponenten – Methoden – Beispiele



4., überarbeitete und ergänzte Auflage



HANSER



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Bodo Heimann, Amos Albert, Tobias Ortmaier, Lutz Rissing

# Mechatronik

Komponenten – Methoden – Beispiele

4., überarbeitete und ergänzte Auflage

Mit 292 Bildern, 44 Tabellen  
und 80 ausführlich durchgerechneten Beispielen



**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

## Die Autoren:

**Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Prof. E.h. Bodo Heimann:** Leibniz Universität Hannover, Institut für Mechatronische Systeme

**Prof. Dr.-Ing. Amos Albert:** Bosch Start-up GmbH, Deepfield Robotics

**Prof. Dr.-Ing. Tobias Ortmaier:** Leibniz Universität Hannover, Institut für Mechatronische Systeme

**Prof. Dr.-Ing. Lutz Rissing:** Leibniz Universität Hannover, Institut für Mikroproduktionstechnik

unter Mitarbeit von

Prof. Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker

Dr.-Ing. Housseem Abdellatif

M. Sc. Steffen Bosselmann

Dipl. Math. Jesús Díaz Díaz

Prof. Dr.-Ing. Martin Grotjahn

Dipl.-Ing. Christian Hansen

Dr.-Ing. Jens Kotlarski

Dr.-Ing. Torsten Lilje



Alle in diesem Buch enthaltenen Programme, Verfahren und elektronischen Schaltungen wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund ist das im vorliegenden Buch enthaltene Programm-Material mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

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.

## 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.

ISBN: 978-3-446-44451-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-44533-8

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Franziska Jacob, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Pustet, Regensburg

Printed in Germany

# Vorwort zur 1. Auflage

Der Begriff „Mechatronik“ (engl. Mechatronics) ist vor ungefähr 30 Jahren im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der Robotertechnik in Japan entstanden und setzt sich aus den beiden Bestandteilen **Mechanik** und **Elektronik** zusammen. Er beinhaltet damals den Einsatz von Mikroprozessoren für die Steuerung von Maschinen. Heute ist mit diesem Wort eine Ingenieurwissenschaft verbunden, deren Ziel die Verbesserung der Funktionalität eines technischen Systems durch eine enge Verknüpfung von mechanischen, elektronischen und datenverarbeitenden Komponenten ist.

Mechatronische Produkte zeichnen sich vor allem dadurch aus, daß ihre Funktionen nur durch das Zusammenwirken dieser Komponenten erreicht werden können und daß eine Funktionsverlagerung stattfindet, etwa aus der Mechanik bzw. aus dem Maschinenbau in die Elektronik und die Informationsverarbeitung. Mit diesem Vorgehen lassen sich neue Lösungen mit erheblichen Leistungs- und Kostenvorteilen finden. Beispiele für mechatronische Produkte sind in der Fahrzeugtechnik, der gesamten Automatisierungstechnik, der Medizintechnik oder der Unterhaltungsindustrie anzutreffen. Schon diese kurze Aufzählung läßt die Komplexität mechatronischer Erzeugnisse erahnen. Sie wird vor allem durch den hohen Integrationsgrad von Komponenten ganz unterschiedlicher Fachgebiete bestimmt.

Diesem Trend der Produktentwicklung muss auch die Ausbildung und Lehre Rechnung tragen, deswegen sind in den letzten Jahren nicht nur in Deutschland an verschiedenen Universitäten, Hochschulen und Fachhochschulen Studiengänge, Fachrichtungen bzw. Studienrichtungen oder spezielle Vertiefungsfächer zur Mechatronik eingerichtet worden. Benötigt wird ein Maschinenbauer mit vertieften Kenntnissen in der Elektronik und Informationsverarbeitung. Umgekehrt wird vom Elektroniker, vom Informatiker oder vom Regelungstechniker zunehmend Systemwissen verlangt, das auch den Maschinenbau einschließt.

Die Mechatronik ist ein sehr umfangreiches Wissensgebiet, und grundsätzlich sind viele Methoden und Kenntnisse, die in der Mechatronik eingesetzt werden, in Teildisziplinen bereits bekannt. Was fehlt, ist eine einheitliche Darstellung der Mechatronik. Diese sollte nach Ansicht der Autoren die wichtigsten Grundlagen und Methoden zur funktionsorientierten Analyse mechatronischer Systeme sowie eine Beschreibung der wesentlichen Wirkprinzipien für die Komponenten zur Synthese solcher Systeme beinhalten. Diesem Konzept folgend, wurde großer Wert auf die modellgestützte Beschreibung mechatronischer Systeme gelegt. Darunter wird die Gesamtheit der Teilsysteme

- Grundsystem (meist mechanisch)
- Aktoren
- Sensoren
- Prozessoren und Prozessdatenverarbeitung

verstanden. Dagegen wurden viele technologierelevante Aussagen, Methoden und Ergebnisse nicht in die Darstellung aufgenommen, z. B. Kenntnisse über spezielle Sensor- bzw. Aktordaten oder zu technischen Details moderner Mikrocontroller und Programmiersprachen. Dies würde einerseits den Rahmen des Buches sprengen, andererseits wegen der immer kürzer werdenden Produktzyklen sehr schnell an Aktualität verlieren. Ganz ausgeklammert wurde

das wichtige Gebiet der „Mikromechatronik“, d. h. der Mikrosystemtechnik und vor allem der Mikromechanik. Allerdings können viele der im Buch beschriebenen Methoden zur Analyse geregelter dynamischer Systeme auf dieses Gebiet übertragen werden.

Das Lehrbuch ist im Niveau und Stoffumfang auf das Studium technischer Fachrichtungen an Universitäten und Fachhochschulen abgestimmt. Der Inhalt wird in neun Kapitel aufgeteilt und enthält Beiträge zu

- Fragen der Modellbildung von Systemen und Prozessen (B. Heimann),
- Aufbau und Wirkungsweise von Aktoren auf elektromagnetischer und fluidischer Basis (K. Popp),
- Wirkprinzipien und Integrationsgrade von Sensoren für die Messung kinematischer und dynamischer Größen (U. Schmucker),
- Grundstrukturen der Prozessdatenverarbeitung unter Echtzeitbedingungen (W. Gerth) sowie zur
- Kinematik, Dynamik und Regelung von Mehrkörpersystemen, die sich als allgemeine Modellklasse für die funktionsorientierte Untersuchung mechatronischer Systeme bewährt haben (B. Heimann).

Großer Wert wird auf Anschaulichkeit gelegt. Deshalb ziehen sich textbegleitende Beispiele durch das gesamte Buch. Außerdem ist ein Kapitel mit ausführlich dargestellten Anwendungen aufgenommen worden.

Natürlich wäre ein solches Buch nicht ohne die Unterstützung zahlreicher Kollegen, Mitarbeiter und Studenten entstanden. Besonderen Dank möchten wir Herrn Dr.sc.techn. Ulrich Schmucker vom Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, Magdeburg, aussprechen, der das Kapitel 3 über Sensoren verfasst hat. Unsere Mitarbeiter, die Herren Dipl.-Ing. M. Daemi, M. Grotjahn, T. Lilge, H. Reckmann, M. Ruskowski, O. Schütte und Dr.-Ing. T. Frischgesell, K.-D. Tieste, haben Teile Ihrer Forschungsprojekte zu ausgewählten Beispielen „vereinfacht“ und viele Beispiele nachgerechnet. Die Manuskriptgestaltung wurde im wesentlichen von Herrn Dipl.-Ing. Zh. Wang von der TU Dresden besorgt. Ihnen allen gilt unserer besonderer Dank. Nicht zuletzt sei dem Verlag, insbesondere Frau Dipl.-Ing. E. Hotho, für das Verständnis und die gute Zusammenarbeit gedankt.

Hannover, Oktober 1997

B. Heimann  
W. Gerth  
K. Popp

# Vorwort zur 4. Auflage

Knapp zehn Jahre nach Erscheinen der 3. Auflage ist es sinnvoll, eine vollständig überarbeitete und erweiterte Version des Buches vorzulegen. Das liegt vor allem auch daran, dass in dieser Zeit ein Generationenwechsel in der Leitung der an der Manuskriptgestaltung beteiligten Institutionen stattgefunden hat, der sich auch im Autorenteam widerspiegelt:

Hinzu gekommen sind die Herren T. Ortmaier (Institut für Mechatronische Systeme), L. Rissing (Institut für Mikroproduktionstechnik) und A. Albert (Vertretungsprofessur am Institut für Regelungstechnik 2011-13, aktuell Geschäftsführer der Bosch Start-up GmbH).

Als Co-Autoren haben sie neue Ideen und Inhalte eingebracht, die in der 4. Auflage ihren Niederschlag finden. Unbedingt in diesem Zusammenhang zu erwähnen ist das Mechatronik-Zentrum Hannover (MZH) – ein Zusammenschluss von Instituten aus der Elektrotechnik/Elektronik, der Informationstechnik/Informatik und dem Maschinenbau. Seine koordinierende Rolle in Lehre und Forschung hat wesentlich zur Neugestaltung des Buches beigetragen.

Das Grundkonzept des Buches wurde beibehalten, nämlich die Darstellung der Grundlagen und die damit verbundene modellgestützte Beschreibung mechatronischer Systeme. Dagegen beinhaltet die vorliegende Neuauflage deutliche inhaltliche Erweiterungen bis hin zur Ergänzung und völligen Neugestaltung ausgewählter Kapitel.

Kapitel	Veränderungen	verantwortlich
<b>Einleitung</b> (Kapitel 1)	Die Einführung fand bis auf kleinere Anpassungen unverändert Eingang in die vierte Auflage.	B. Heimann
<b>Aktoren</b> (Kapitel 2)	Dieses Kapitel konnte aufgrund seines langfristig gültigen Grundlagencharakters bis auf einige Ergänzungen weitestgehend erhalten werden. Es stammte ursprünglich von Prof. KARL POPP, der wertvolle Beiträge zur Mechatronik beisteuerte, aber bedauerlicherweise 2005 verstarb.	T. Ortmaier
<b>Sensoren</b> (Kapitel 3)	Die Erweiterungen des ursprünglich von Prof. ULRICH SCHMUCKER verfassten Kapitels tragen insbesondere dem rasanten Fortschritt in der Sensortechnologie Rechnung. Einer der neuen Schwerpunkte ist die Weg- und Winkelmessung mit photoelektrischen Messgeräten.	L. Rissing
<b>Signalverarbeitung</b> (Kapitel 4)	Neben vielen inhaltlichen Vertiefungen, z. B. bei den stochastischen Signaleigenschaften, finden nun insbesondere auch Filtertechnologien und optimale Filterung Berücksichtigung und erfahren eine ausführliche Behandlung.	A. Albert
<b>Prozessdatenverarbeitung</b> (Kapitel 5)	Die Ausführungen folgen in weiten Teilen den früheren Auflagen und tragen im Kern die „Denke“ der Echtzeit-Schule des geschätzten Prof. i.R. WILFRIED GERTH. Erweiterungen wurden z. B. für die Taskeinplanung vorgenommen.	A. Albert
<b>Mehrkörpersysteme</b> (Kapitel 6)	Dieses Kapitel wurde redaktionell überarbeitet und inhaltlich gestrafft.	B. Heimann

Kapitel	Veränderungen	verantwortlich
<b>Systembeschreibung</b> (Kapitel 7)	Dieses Kapitel wurde neu aufgenommen, um eine zusammenhängende Darstellung der Modellbeschreibung mechatronischer Systeme zu ermöglichen. Zusätzlich enthält es Ausführungen zur System- und Parameteridentifikation und zu deren Aspekten in der praktischen Umsetzung.	A. Albert, T. Ortmaier
<b>Regelung</b> (Kapitel 8)	Es ist völlig neu gestaltet und enthält fortgeschrittene methodische Ansätze und Erweiterungen. In diesem Zusammenhang sind die Beiträge zur optimalen und robusten Regelung und vor allem zum Entwurf und der Implementierung digitaler Regelungen zu nennen.	A. Albert

Vollständig erneuert wurde auch das Kapitel 9 „Beispiele mechatronischer Systeme“. Es verdeutlicht die Praxisrelevanz der vorgestellten Verfahren. Sechs Beiträge aus der Industrie wurden zu den nachfolgenden Themen erstellt und sind online auf der Homepage zum Buch verfügbar unter <http://www.imes.uni-hannover.de/Mechatronik-Buch.html>.

Beiträge und Autoren
<b>Automatische Reglerparametrierung eines Hubwerks</b> M. Sc. D. Beckmann, Dr. J. Immel
<b>Schwingungsdämpfung im Kfz-Antriebsstrang</b> Dr.-Ing. L. Quernheim, Dr.-Ing. S. Zemke
<b>Zustandsregelung zeitvarianter Systeme am Beispiel einer Drosselklappe</b> Prof. Dr.-Ing. M. Grotjahn, M. Eng. B. Luck
<b>Modellbasierte Regelung eines Deltaroboters</b> Dr.-Ing. J. Kühn, Dipl.-Ing. J. Öltjen
<b>Bildbasierte Regelung bei einer mobilen Manipulationsaufgabe</b> M. Eng. (FH) A. Michaels, Prof. Dr.-Ing. A. Albert
<b>Inertiale Stabilisierung einer Lastkarre mit Momentenkreiseln</b> Prof. Dr.-Ing. A. Albert, B. Eng. O. Breuning, Dipl.-Ing. (FH) S. Petereit, Dr.-Ing. T. Lilge

Unser herzlicher Dank gilt den Autoren für ihr Engagement und die anschauliche Beschreibung dieser interessanten Aspekte mechatronischer Systeme.

Herrn Prof. **Bodo Heimann** sowie seinen Co-Autoren der ersten Auflage, Prof. **Wilfried Gerth** und Prof. **Karl Popp** sei auf diesem Wege ganz besonders gedankt, einerseits für Ihren unerschöpflichen Einsatz für die Mechatronik und andererseits für die Ehre, das „Erbe“ dieses Buches fortführen zu dürfen.

In diesem Zusammenhang möchten wir uns auch bei unseren Mitarbeitern bedanken, die einzelne Abschnitte technisch umgesetzt haben. Das betrifft vor allem die Herren Dipl.-Ing. Daniel Ramirez und Dipl.-Ing. Johannes Gaa. Des Weiteren dürfen wir auch unsere Studenten nicht unerwähnt lassen – sie gaben uns in den Vorlesungen, auf denen Teile des Buches basieren, zahlreiche Hinweise und Vorschläge zur didaktischen Aufbereitung der Inhalte.

Insbesondere die Veranstaltungen „Mechatronische Systeme“ (T. Ortmaier & L. Rissing), „Robotik I+II“ (T. Ortmaier), sowie Vorlesungen zur Regelungstheorie, nämlich „Identifikation & Filterung“, „Mathematische Optimierungsmethoden“ und „Erweiterte Regelungsverfahren“ (alle A. Albert), fanden Eingang in die inhaltliche Ausgestaltung des Buches.

Frau Franziska Jacob vom Fachbuchverlag Leipzig hat so manche Terminverschiebung „schlucken“ müssen. Ihr sei ebenfalls für das Verständnis und die gute Zusammenarbeit gedankt.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Grundbegriffe</b> .....	<b>13</b>
1.1	Grundbegriffe der Mechatronik .....	13
1.2	Prozessanalyse mechatronischer Systeme .....	16
1.3	Modellbildung und Funktionsbegriff in der Mechatronik .....	21
1.4	Entwurf mechatronischer Systeme .....	24
1.5	Gliederung des Buches .....	27
<b>2</b>	<b>Aktoren</b> .....	<b>29</b>
2.1	Aufbau und Wirkungsweise der Aktoren .....	30
2.2	Aufbau und Wirkprinzipien elektromagnetischer Aktoren .....	34
2.2.1	Grundlagen elektrodynamischer Wandler .....	35
2.2.2	Bauformen elektrodynamischer Wandler .....	39
2.2.3	Grundlagen elektromagnetischer Wandler .....	43
2.2.4	Bauformen elektromagnetischer Wandler .....	46
2.2.5	Ausführungen und Kenndaten elektromagnetischer Aktoren .....	48
2.3	Fluidische Aktoren .....	51
2.3.1	Gegenüberstellung von hydraulischen und pneumatischen Aktoren .....	54
2.3.2	Grundlagen hydraulischer Wandler .....	55
2.3.3	Ausführungsformen und Kenndaten hydraulischer Aktoren .....	59
2.4	Neuartige Aktoren .....	62
2.4.1	Grundlagen piezoelektrischer Wandler .....	62
2.4.2	Ausführungsformen und Kenndaten piezoelektrischer Aktoren .....	67
2.5	Vergleich ausgewählter Aktoren .....	68
<b>3</b>	<b>Sensoren</b> .....	<b>71</b>
3.1	Einführung und Begriffe .....	72
3.2	Sensoren zur Messung von Dehnung, Kraft, Drehmoment und Druck .....	80
3.2.1	Sensoren zur Messung von Dehnungen .....	80
3.2.2	Auswertung von DMS und Kraftmessung .....	84
3.2.3	Weitere Sensoren zur Kraft- und Druckmessung .....	86
3.3	Sensoren zur Messung von Weg- und Winkelgrößen .....	91
3.3.1	Potentiometrische Verfahren .....	91
3.3.2	Photoelektrische Messgeräte .....	93
3.3.3	Längen- und Winkelmessung durch Nutzung magnetischer Prinzipien ..	104
3.3.4	Optische Triangulation .....	113
3.4	Geschwindigkeits- und Winkelgeschwindigkeitssensoren .....	115
3.4.1	Tachogeneratoren .....	116
3.4.2	Drehratensensoren .....	117

3.4.3	Laservibrometer .....	118
3.5	Beschleunigungs- und Winkelbeschleunigungssensoren .....	119
3.5.1	Beschleunigungssysteme basierend auf dem Feder-Masse-Prinzip .....	119
3.5.2	FERRARIS-Sensor .....	123
3.5.3	Beschleunigungssensor mit magnetischer Wandlung .....	123
3.5.4	Weitere Beschleunigungssensorprinzipien .....	124
3.6	Sensoren zur Messung von Temperatur und Strömung .....	125
3.6.1	Thermistoren .....	125
3.6.2	Thermoelemente .....	128
3.6.3	Sensoren zur Strömungsmessung: Hitzdrahtanemometer .....	129
3.7	Ausblick auf weitere Sensoren .....	130
<b>4</b>	<b>Signalverarbeitung .....</b>	<b>137</b>
4.1	Darstellung von Signalen .....	137
4.1.1	Signalklassen .....	137
4.1.2	Verteilungs- und Verteilungsdichtefunktion .....	139
4.1.3	Signalkennwerte und Signalkennfunktionen .....	141
4.1.4	Formfiltersynthese .....	149
4.1.5	Überlagerung von Signalen .....	152
4.1.6	Zeitdiskrete Signale, periodische Abtastung .....	156
4.1.7	Näherungsformeln und Rechenvorschriften .....	159
4.2	Filtertechnologien .....	164
4.2.1	Filter zur Signalverarbeitung .....	164
4.2.2	Filter zur Erzeugung zeitlicher Ableitungen .....	169
4.2.3	Optimale Filterung: KALMAN-Filter .....	173
4.2.4	Erweiterungen des KALMAN-Filters .....	179
<b>5</b>	<b>Prozessdatenverarbeitung .....</b>	<b>185</b>
5.1	Begriffe der Echtzeitdatenverarbeitung .....	186
5.2	Ereignisbehandlung .....	187
5.3	Multitasking .....	191
5.3.1	Prozesszustände .....	191
5.3.2	Task-Einplanung und Schedulingstrategien .....	195
5.3.3	Synchronisation von Prozessen .....	200
5.3.4	Spezielle Hardware-Architekturen .....	207
5.4	Echtzeitkonforme Netzwerke .....	208
5.5	Bewertung von Echtzeitsystemen .....	211
<b>6</b>	<b>Modellbildung von Mehrkörpersystemen .....</b>	<b>215</b>
6.1	Kinematik von Mehrkörpersystemen .....	217
6.1.1	Koordinatensysteme und Koordinatentransformationen .....	217
6.1.2	Beispiele für Rotationsmatrizen (Drehmatrizen) .....	220
6.1.3	Homogene Koordinaten und homogene Transformationen .....	223
6.1.4	Mechanische Ersatzsysteme mit Baumstruktur .....	227
6.1.5	Direkte und inverse Kinematik .....	230
6.1.6	Differentielle Kinematik und JACOBI-Matrix .....	234

6.2 Kinetik von Mehrkörpersystemen ..... 237  
 6.2.1 Grundgleichungen für den starren Körper ..... 239  
 6.2.2 NEWTON-EULER-Methode ..... 243  
 6.2.3 LAGRANGE'sche Methode ..... 247

**7 Systembeschreibung .....253**

7.1 Lineare, zeitinvariante Systeme ..... 253  
 7.1.1 Klemmenmodell ..... 254  
 7.1.2 Zustandsraumdarstellung ..... 257  
 7.1.3 Stabilitätsbegriff ..... 262  
 7.1.4 Stabilitätskriterien – Systemmatrix ..... 265  
 7.1.5 Stabilitätskriterien – Übertragungsfunktion ..... 268  
 7.2 Modellvereinfachung und -reduktion ..... 273  
 7.2.1 Approximation ..... 274  
 7.2.2 Linearisierung ..... 277  
 7.2.3 Ordnungsreduktion ..... 281  
 7.3 Parameter- und Systemidentifikation ..... 286  
 7.3.1 Einführung in Schätzprobleme ..... 287  
 7.3.2 Prozess zur Identifikation ..... 291  
 7.3.3 Identifikation parametrischer, linearer, zeitdiskreter Systeme ..... 293  
 7.4 Aspekte der Identifikation in der Praxis ..... 301  
 7.4.1 Datenvorverarbeitung ..... 301  
 7.4.2 Bestimmung der Modellordnung ..... 302  
 7.4.3 Identifizierbarkeit und Anregung ..... 307  
 7.4.4 Identifikation im geschlossenen Regelkreis ..... 311  
 7.4.5 Identifikation kontinuierlicher Systeme ..... 313  
 7.4.6 Parameteridentifikation mechatronischer Systeme ..... 317

**8 Regelung .....321**

8.1 Entwurfsziele und Grundlagen ..... 322  
 8.1.1 Bewertungskriterien ..... 323  
 8.1.2 Empfindlichkeitsfunktionen und Entwurfslimitierungen ..... 326  
 8.2 Klassische Regelung linearer Systeme ..... 336  
 8.2.1 PID-Regler ..... 336  
 8.2.2 Auslegungsverfahren ..... 338  
 8.3 Zustandsregelung ..... 344  
 8.3.1 Einführung in die Zustandsregelung ..... 344  
 8.3.2 Beobachter und beobachtergestützte Regelung ..... 348  
 8.4 Optimale und robuste Regelung ..... 353  
 8.4.1 Optimale Regelung mit quadratischem Gütemaß ..... 354  
 8.4.2 Robuste Regelung ( $\mathcal{H}_2$ -,  $\mathcal{H}_\infty$ -Regelung) ..... 361  
 8.5 Digitale Regelung (Abtastregelung) ..... 369  
 8.5.1 Zeitdiskrete Systembeschreibung ..... 370  
 8.5.2 Entwurf und Implementierung digitaler Regelungen ..... 382  
 8.6 Ausblick: Weitere Regelungsverfahren ..... 396

<b>9</b>	<b>Beispiele mechatronischer Systeme .....</b>	<b>399</b>
<b>A</b>	<b>Mathematische Grundlagen .....</b>	<b>403</b>
A.1	Integraltransformationen .....	403
A.1.1	LAPLACE-Transformation .....	403
A.1.2	FOURIER-Transformation .....	404
A.1.3	$\mathcal{Z}$ -Transformation .....	406
A.1.4	Korrespondenztabelle und deren Anwendung .....	407
A.2	Matrizenrechnung .....	409
A.2.1	Begriffe und einfache Rechenregeln .....	409
A.2.2	Eigenwerte, Eigenvektoren .....	410
A.2.3	Ähnlichkeitstransformation (Hauptachsentransformation) .....	411
A.2.4	Normen .....	412
A.2.5	Lineare Gleichungssysteme und Singulärwertzerlegung .....	414
A.3	Lineare, zeitinvariante dynamische Systeme .....	416
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>419</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>427</b>
	<b>Index .....</b>	<b>437</b>

# 1

## Einleitung und Grundbegriffe

In vielen Bereichen des Maschinenbaus, der Fahrzeugtechnik, der Produktionstechnik oder der Mikrosystemtechnik entstehen Produkte, bei denen die Lösung nur durch Integration von mechanischen, elektrotechnischen bzw. elektronischen und informationsverarbeitenden Komponenten erreicht werden kann. Beispiele dafür sind Fahrdynamikregelungs- und Fahrerassistenzsysteme, Handhabungssysteme und Roboter in der industriellen Automation, mobile Roboter zu Land, Wasser und in der Luft, moderne Werkzeugmaschinen mit magnetisch gelagerten Fräs- und Drehspindeln, Einrichtungen des aktiven Schwingungsschutzes, interaktive Spielekonsolen im Bereich der Unterhaltungselektronik, mikromechanische Produkte der Medizintechnik und vieles mehr.

Diese Geräte und Einrichtungen werden **mechatronische Produkte** oder allgemein **mechatronische Systeme** genannt. Zu ihrer Realisierung sind neben den mechanischen Komponenten eine geeignete Sensorik und Aktorik nötig, ferner eine dazu passende Mikrorechenstechnik und mathematische Modelle zur Informationsgewinnung aus gemessenen Signalen.

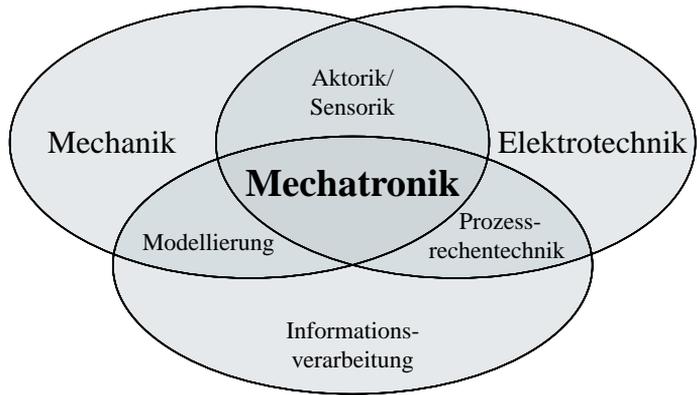
### ■ 1.1 Grundbegriffe der Mechatronik

Der Begriff „Mechatronik“ (engl. Mechatronics) setzt sich aus den beiden Bestandteilen **Mechanik** und **Elektronik** zusammen. Er wurde 1969 durch die japanische Firma Yaskawa Electric Cooperation geprägt und ab 1971 von dieser Firma als Handelsname geschützt. Ursprünglich war damit die Ergänzung mechanischer Komponenten durch Elektronik in der Gerätetechnik gemeint. Ein typisches Beispiel hierfür war die Entwicklung von Spiegelreflexkameras. Seit 1982 ist dieser Begriff frei verfügbar. Heute ist mit diesem Wort eine Ingenieurwissenschaft verbunden, die auf den klassischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik aufbaut und deren Ziel die Verbesserung der Funktionalität eines technischen Systems durch ihre **integrale** und **synergetische** Verknüpfung ist (Bild 1.1).

Zur Charakterisierung von **mechatronischen Systemen** wird aus der Vielzahl von Beschreibungen exemplarisch die folgende ausgewählt, die von der „International Federation of Automatic Control (IFAC) – Technical Committee on Mechatronic Systems“ stammt.

*Mechatronics is the synergistic combination of precision mechanical engineering, electronic control and systems thinking in the design of products and manufacturing processes. It covers the integrated design of mechanical parts with an embedded control system and information processing.*

Aus diesen Darlegungen wird klar, dass die Mechatronik interdisziplinären Charakter besitzt und die folgenden Gebiete umfasst:



**Bild 1.1**  
Bestandteile der Mechatronik

Disziplin	Beispiele für Teildisziplinen
Mechanik	Maschinen, Maschinenbau, Feinwerktechnik, Dynamik, Kinetik
Elektrotechnik	Mikroelektronik, Leistungselektronik, Messtechnik, Signalverarbeitung
Informationsverarbeitung	Regelungstechnik, Prozessdatenverarbeitung, künstliche Intelligenz

Ferner ist die Mechatronik einem ständigen Wandel unterzogen. Sie ist eine **synergetische** Disziplin, die ihrerseits durch die Entwicklung in den Einzeldisziplinen vorangetrieben wird [Bis07].

Weitere Ausführungen hierzu sind in [Ise08, Jan10, WI11, Bis07, Onw05] enthalten.

Die technische Umsetzung mechatronischer Systeme setzt im Allgemeinen Mess-, Regelungs- und Stellglieder voraus, d. h., neben der Mechanik müssen weitere Disziplinen herangezogen werden, z. B. Sensorentwicklung und Sensorintegration, Regelungstechnik, Aktorik und Informationsverarbeitung. Zur weiteren Erläuterung sei Bild 1.2 betrachtet.

Wichtige Messgrößen in mechatronischen Systemen sind

Messgrößen	Beispiele
elektrische Größen	Strom, Spannung, Feldstärke, magnetische Flussdichte usw.
mechanische Größen	Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Drehmoment, Temperatur, Druck usw.

Von großer Bedeutung für die Anwendung der dazu notwendigen Messsysteme (**Sensoren**) ist ihre Integrationsfähigkeit in den Prozess. Diese wird wesentlich bestimmt durch ihre Dynamik, Auflösung, Robustheit, Eignung zur Miniaturisierung sowie ihre Fähigkeit zur digitalen Signalverarbeitung.

Die **Aktoren** setzen die mithilfe der Informationsverarbeitung erzeugten Stellsignale in Stellgrößen um. Dazu ist wegen der energieverstärkenden Wirkung dieser Stellglieder eine Hilfsenergie notwendig, die elektrischer oder fluidischer (hydraulischer, pneumatischer) Natur sein kann. Moderne Stellglieder verfügen über Lageregelkreise, die häufig modellgestützt und digital arbeiten und damit hohe Positioniergenauigkeiten bei gleichzeitig guter Stelldynamik ermöglichen.

Ein wesentliches Merkmal mechatronischer Systeme besteht darin, dass ihre Eigenschaften in hohem Maße durch nichtmaterielle Elemente, d. h. durch Software, bestimmt werden. Die Verarbeitung der Daten erfolgt häufig durch speziell für die Echtzeitdatenverarbeitung geeignete **Prozessoren**. Sie enthalten die dazu notwendigen Funktionen, wie Datenspeicher, Programm-