

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

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. Houssein 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, 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
Einleitung (Kapitel 1)	Die Einführung fand bis auf kleinere Anpassungen unverändert Eingang in die vierte Auflage.	B. Heimann
Aktoren (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
Sensoren (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
Signalverarbeitung (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
Prozessdatenverarbeitung (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
Mehrkörpersysteme (Kapitel 6)	Dieses Kapitel wurde redaktionell überarbeitet und inhaltlich gestrafft.	B. Heimann

Kapitel	Veränderungen	verantwortlich
Systembeschreibung (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
Regelung (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
Automatische Reglerparametrierung eines Hubwerks M. Sc. D. Beckmann, Dr. J. Immel
Schwingungsdämpfung im Kfz-Antriebsstrang Dr.-Ing. L. Quernheim, Dr.-Ing. S. Zemke
Zustandsregelung zeitvarianter Systeme am Beispiel einer Drosselklappe Prof. Dr.-Ing. M. Grotjahn, M. Eng. B. Luck
Modellbasierte Regelung eines Deltaroboters Dr.-Ing. J. Kühn, Dipl.-Ing. J. Öltjen
Bildbasierte Regelung bei einer mobilen Manipulationsaufgabe M. Eng. (FH) A. Michaels, Prof. Dr.-Ing. A. Albert
Inertiale Stabilisierung einer Lastkarre mit Momentenkreiseln 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

1	Einleitung und Grundbegriffe	13
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
2	Aktoren	29
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
3	Sensoren	71
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
4	Signalverarbeitung	137
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
5	Prozessdatenverarbeitung	185
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
6	Modellbildung von Mehrkörpersystemen	215
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 Systembeschreibung253

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 Regelung321

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}_∞ -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

9	Beispiele mechatronischer Systeme	399
A	Mathematische Grundlagen	403
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
	Formelzeichen und Abkürzungen	419
	Literatur	427
	Index	437

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:

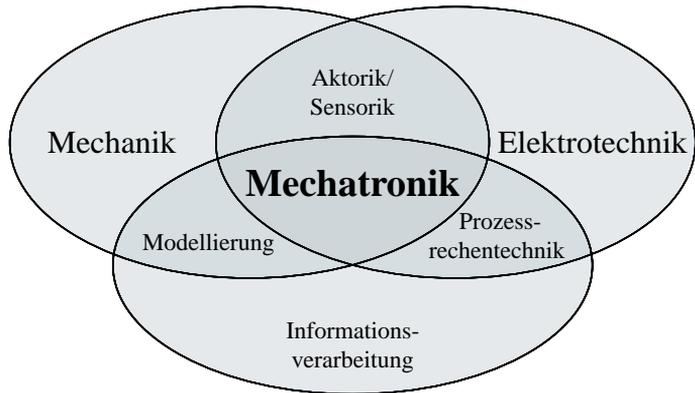


Bild 1.1
Bestandteile der Mechatronik

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-

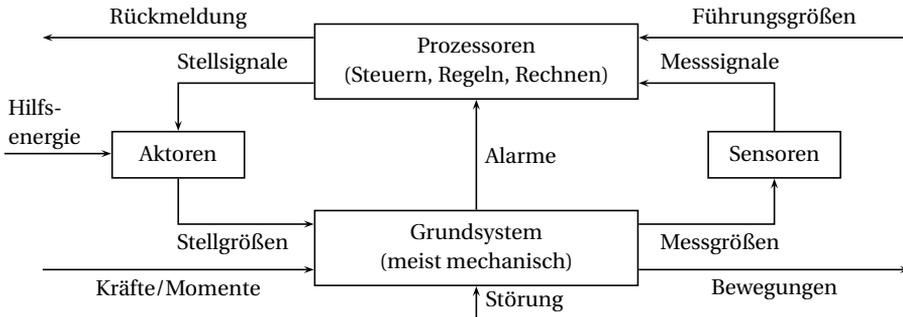


Bild 1.2 Schema zur Erläuterung eines mechatronischen Systems

speicher, AD-Wandler, I/O-Ports, Interruptverwaltungen usw. Die Prozessdatenverarbeitung geschieht in mehreren Stufen und übernimmt – je nach Ausbaustufe – verschiedene Aufgaben der Regelung, Überwachung und Optimierung, man vergleiche hierzu die in Bild 1.3 exemplarisch dargestellten vier Ebenen:

Ebene	Kurzbeschreibung
Ebene 1	Prozessebene
Ebene 2	Steuerung, Regelung, Rückführung auf Prozessniveau
Ebene 3	Alarmmeldung (Grenzwertkontrolle), Überwachung und Fehlerdiagnose, Ableitung von einfachen Maßnahmen für den Weiterbetrieb bzw. Stopp
Ebene 4	Koordinierung von Teilsystemen, Optimierung, allgemeines Prozessmanagement

Im Allgemeinen gilt, dass die unteren Ebenen schnell reagieren und lokal wirken, während die oberen Ebenen langsam reagieren und globale Aufgaben übernehmen.

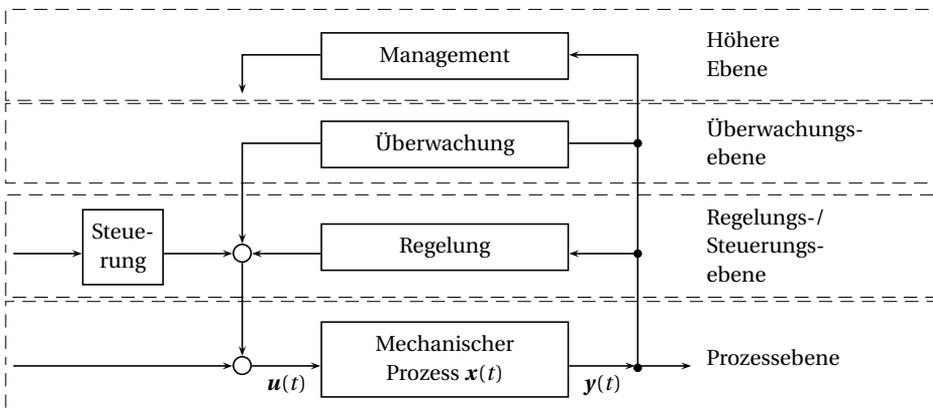


Bild 1.3 Ebenen der Prozessdatenverarbeitung (nach [lse08])

Die meisten bekannt gewordenen Ansätze für mechatronische Systeme verfügen über eine Signal- und Prozessdatenverarbeitung der unteren Ebenen, d. h., sie übernehmen die Steuerung und Regelung sowie einfache Überwachungsfunktionen. Ein typisches Beispiel ist die

Einzelachsregelung eines Industrieroboters. Die digitale Informationsverarbeitung erlaubt aber wesentlich mehr, z. B. die bereits erwähnte Koordinierung und Optimierung der Teilsysteme und damit die Realisierung von Komponenten der künstlichen Intelligenz. Als Beispiel hierfür kann der autonom agierende mobile Roboter angeführt werden, der über ein „Multi-Sensor-System“ verfügt und selbstständig Handlungsentscheidungen treffen und ausführen kann.

Die grundsätzlichen Strukturen der Informationsverarbeitung unter Echtzeitbedingungen werden in Kapitel 5 beschrieben.

■ 1.2 Prozessanalyse mechatronischer Systeme

Die Begriffe **System** und **Prozess** spielen in den weiteren Untersuchungen eine wichtige Rolle und werden deshalb genauer erklärt.

Allgemein gilt, dass **Systeme** als Teil der Wirklichkeit definiert sind. Sie stellen eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden dar und haben wegen dieser Eigenschaft relativen Charakter. Die Abgrenzung eines Systems zu seiner Umwelt kann durch eine Hüllfläche, die Systemgrenze, beschrieben werden. Genauer betrachtet ist ein System stets eine Gesamtheit von Teilsystemen, die untereinander und mit der Umwelt informatorisch verbunden sind. Sie können über ihre Kopplungen, das sind in der Regel Signale und Energieflüsse/Materieflüsse, beeinflusst und beobachtet werden.

Aus dem Gesagten folgt, dass der Begriff System zunächst an kein Fachgebiet gebunden ist, also auch auf nichttechnische Bereiche angewendet werden kann. Von besonderer Bedeutung für die in diesem Buch behandelte Problematik sind **mechatronische Systeme**. Darunter wird die Gesamtheit der Teilsysteme

– Grundsystem (meist mechanisch),	(Kapitel 6, 7, 8)
– Aktoren,	(Kapitel 2)
– Sensoren,	(Kapitel 3)
– Prozessoren und Prozessdatenverarbeitung	(Kapitel 4, 5)

verstanden. Ausführungen zu diesen sind in den aufgeführten Buchkapiteln zu finden.

Für eine genauere Betrachtung der Verknüpfungen zwischen Grundsystem, Sensoren, Aktoren und Informationsverarbeitung ist die Benutzung von **Flüssen** hilfreich. Grundsätzlich werden drei Arten von Flüssen unterschieden, nämlich Materieflüsse, Energieflüsse und Informationsflüsse, siehe auch [Ise08].

Bild 1.4 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Flüsse einschließlich einiger typischer Beispiele. Dabei kann zur genaueren Unterteilung noch in Haupt- und Nebenflüsse unterschieden werden, d. h. in solche, die wesentlich oder in solche, die von untergeordneter Bedeutung für die Funktion des betrachteten mechatronischen Systems sind.

Mit den bisherigen Begriffen und Definitionen kann die allgemeine Struktur eines mechatronischen Systems in Anlehnung an [Ise08] als Blockschaltbild dargestellt werden, vgl. Bild 1.5. Der Bediener gibt über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle die Führungsgrößen (z. B. gewünschte Geschwindigkeit, Kraft etc.) und somit das Sollverhalten vor. Die Informationsverarbeitung

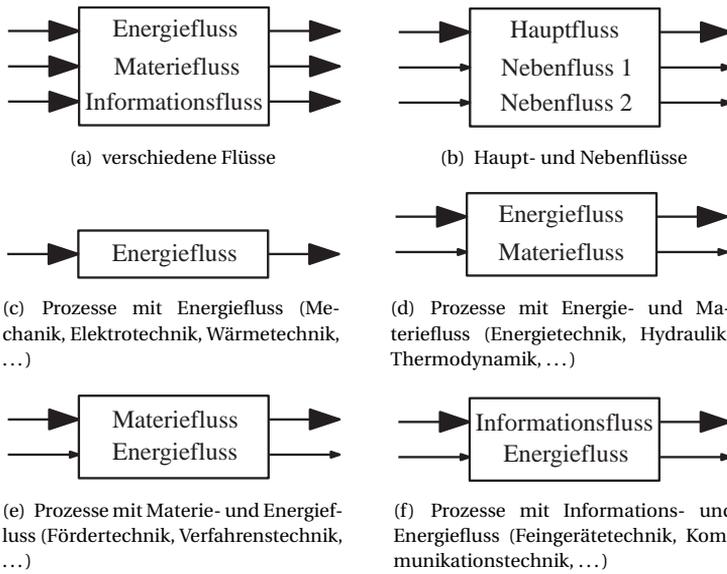


Bild 1.4 Materie-, Energie- und Informationsfluss

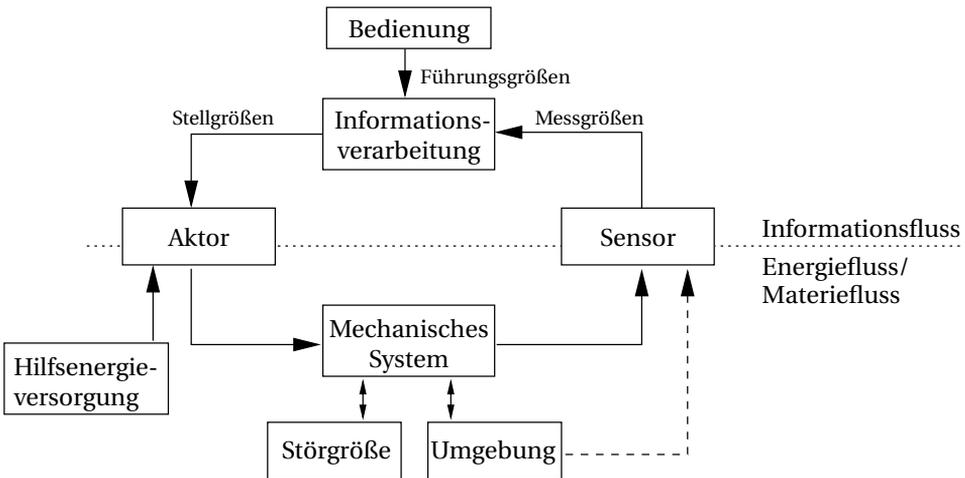


Bild 1.5 Allgemeine Struktur eines mechatronischen Systems (nach [Ise08])

(z. B. Prozessrechner) erfasst die Führungsgrößen und vergleicht diese mit den Messgrößen. Letztere werden mittels Sensoren gemessen und stellen vereinfacht den Ist-Zustand des Systems dar. Das Ergebnis sind Stellgrößen, die von den Aktoren unter Zuhilfenahme von Hilfsenergie umgesetzt werden und auf das mechanische System wirken. Dieses steht in Wechselwirkung mit seiner Umwelt und ist ggf. Störgrößen ausgesetzt. Deutlich zu erkennen sind der Materie-, Energie- und Informationsfluss – ebenso ist die Ähnlichkeit zu einem geschlossenen Regelkreis offensichtlich.

Beispiel 1.1 Riementrieb als Servo-Einzelachse

Ein Riementrieb (z. B. Förderband) soll ein Objekt mit einer vom Benutzer vorgegebenen Geschwindigkeit bewegen, vgl. Bild 1.6. Aus der Führungsgröße und dem gemessenen Achswinkel (durch numerische Differentiation lässt sich daraus die aktuelle Geschwindigkeit bestimmen) berechnet der Regler einen Motorsollstrom.

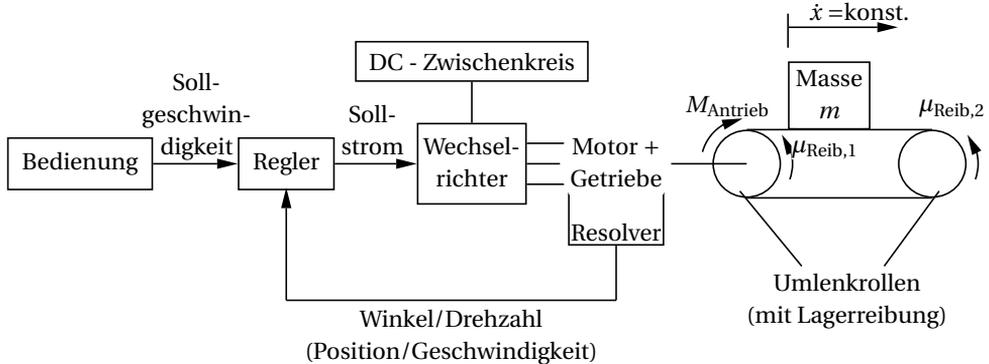


Bild 1.6 Skizze eines Riementriebs

Dieser wird, unter Zuhilfenahme eines Wechselrichters, der seine Energie aus einem DC-Zwischenkreis bezieht, in die Motorstränge eingepreßt (Die Messung der Strangströme und deren Rückführung in den Stromregler, d. h. die innere Kaskade ist hier nicht dargestellt.). Im Ergebnis bewegt der Motor den Riemen und somit das sich darauf befindliche Objekt mit der Masse m . Bei Beschleunigungen wirken entsprechende Trägheiten auf den Antrieb. Als Störung treten beispielsweise viskose und COULOMB'sche Reibung auf.

Die Struktur des Riementriebs als mechatronisches System gemäß Bild 1.5 ist in Bild 1.7 dargestellt. ■

Ein **Prozess** ist die zeitliche Aufeinanderfolge von Erscheinungen bzw. Zuständen in einem System. Durch ihn wird die Umformung und/oder der Transport von Materie, Energie und Information beschrieben. Seine Darstellung führt auf Zeitverläufe von Signalen, Zuständen usw.

Zur Beschreibung von Prozessen sind weitere Größen notwendig. Es sind dies die **Systemzustände**, die zu einem Zustandsvektor $x(t)$ zusammengefasst werden. Durch das Phasenporträt, also dem Verlauf des Zustandsvektors im zugehörigen Zustandsraum, wird die Zeitgeschichte der Systemzustände beschrieben. Typisch für mechatronische Systeme ist, dass eine Änderung der Systemzustände aktiv gewollt ist. Dazu wird über die Eingangsgrößen Einfluss auf das System genommen.

Der Prozessbegriff ist folglich untrennbar mit einer zeitlichen Änderung, d. h. mit der **Systemdynamik**, verbunden. Auch er ist allgemein und kann unterschiedlicher Natur sein. Für den Lehrer ist das Führen einer Schulklasse der Prozess, für den Roboter das Positionieren eines Bauteils, für den Sensor die Aufnahme und die Verarbeitung der Messinformation, für die NC-Steuerung einer Werkzeugmaschine der Zerspanvorgang usw. Zur Erklärung der eingeführten Begriffe dient das folgende Beispiel.

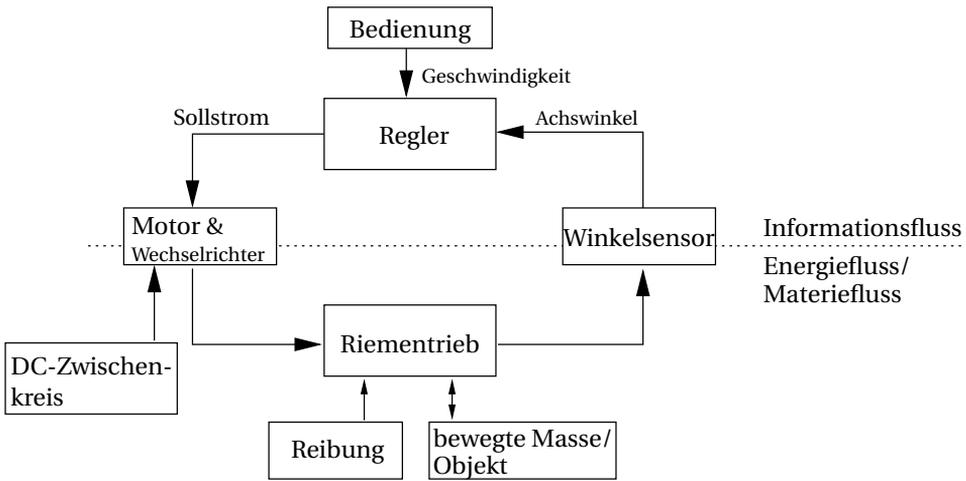


Bild 1.7 Riementrieb als Beispiel eines mechatronischen Systems (vereinfachte Darstellung)

Beispiel 1.2 Prinzip einer aktiven Federung bei Fahrzeugen

In der Fahrzeugdynamik können passive Radaufhängungen durch aktive Federungen ersetzt werden. Dadurch lassen sich die unterschiedlichen Forderungen nach Fahrkomfort und Fahrverhalten besser als mit passiven Elementen erfüllen. Bild 1.8 zeigt das Schema einer aktiven Federung für ein „Viertelfahrzeug“.

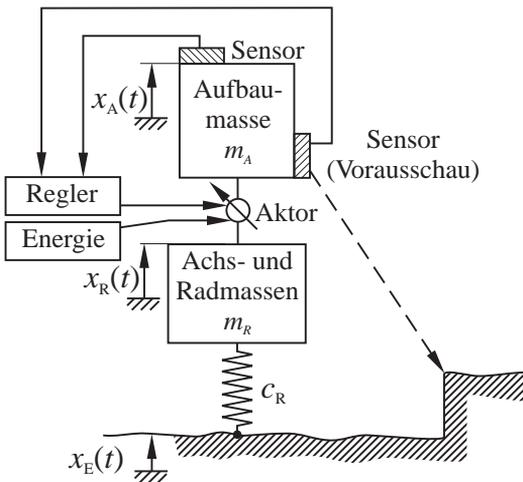


Bild 1.8 Prinzip der aktiven Federung bei einem „Viertelfahrzeug“ (nach [KL94])

Das mechanische Grundsystem besteht aus einem Feder-Masse-System für die Beschreibung der Vertikalbewegung. Installiert sind Sensoren zur Messung der Aufbaubeschleunigung (als Maß für den Fahrkomfort) und zur (optischen) Detektion von Einzelhindernissen durch Vorausschau. Die dadurch mögliche Information über die Bodenkontur erlaubt es dem aktiven System schon bei Annäherung an ein Hindernis, sich auf die zu erwartenden Radbewegungen einzustellen. Als Aktoren kommen pneumatische und hydraulische Stellglieder in Betracht.

Die Systemzustände werden durch den Zustandsvektor

$$\mathbf{x}(t) = [x_A(t), x_R(t), \dot{x}_A(t), \dot{x}_R(t)]^T$$

beschrieben und enthalten Schwingweg und Schwinggeschwindigkeit von Fahrzeugaufbau sowie zusammengefassten Achs- und Radmassen. ■

Jedes System steht mehr oder weniger mit seiner Umwelt in Wechselwirkung. Die Wechselwirkungen werden im Unterschied zu den inneren Kopplungen, die die Verkopplung der einzelnen Teilsysteme beschreiben, durch die äußeren Kopplungen erfasst. Bild 1.9 zeigt das Prinzip eines Systemaufbaus mit seinen Wechselwirkungen. Dabei werden durch ausgezogene Pfeile wesentliche und durch die gestrichelte Pfeile unwesentliche Verbindungen dargestellt.

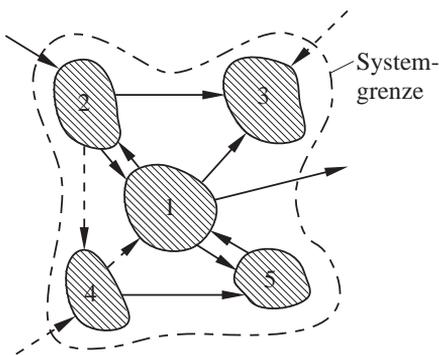


Bild 1.9
Prinzipieller Systemaufbau (5 Teilsysteme)

Welche Größen wesentlich sind, hängt von der Zielstellung ab und ist deshalb ebenfalls relativ. Wesentliche Kopplungen müssen

- aussagekräftig für das betrachtete Problem sein oder als aussagekräftig gelten und
- mit vorhandenen Mess- und Bestimmungsmethoden bei vertretbarem Aufwand erfasst werden können.

Wie schon erwähnt, werden als Systemkopplungen **Signale** benutzt. Praktisch sind es physikalische Größen, wie Strom, Spannung, Druck, Weg, Temperatur, die Informationen über das System enthalten. Zugänglich sind diese Größen über spezielle Signalkenngrößen, wie Amplitude, Frequenz, Phase, oder Signalkennfunktionen, wie Amplitudenfrequenzgang, Phasenfrequenzgang, Impulsantwortfunktion usw. (vgl. Kapitel 4, 7)

In der Regel werden an einem System mehrere Eingangssignale $u_i(t), i = 1, 2, \dots, m$ und Ausgangssignale $y_i(t), i = 1, 2, \dots, r$ vorhanden sein (Bild 1.10).

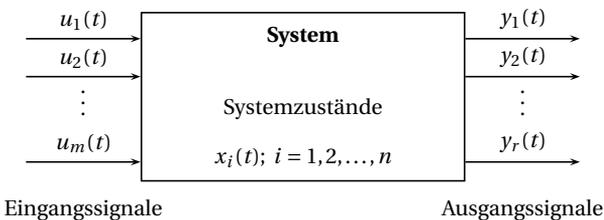


Bild 1.10
Allgemeines Blockschaftbild eines Systems

Aufgrund der gesamten Mess-, Aufnahme- und Verarbeitungstechnik sowie anderer nicht berücksichtigter Einflussgrößen sind die Signale mit Unsicherheiten behaftet. Die Signale sind verrauscht. Zu ihrer Beschreibung müssen die Methoden der **Wahrscheinlichkeitsrechnung**, insbesondere zur Untersuchung von **Zufallsprozessen**, oder der **unscharfen Prozessanalyse** eingesetzt werden (vgl. z. B. [BP00, DR87] und Kapitel 4).

■ 1.3 Modellbildung und Funktionsbegriff in der Mechatronik

Die Untersuchung von Systemen und Prozessen erfolgt mithilfe von Modellen. Modelle sind immer eine ziel- bzw. funktionsorientierte Beschreibung bzw. Nachbildung der wesentlichen Zusammenhänge des betrachteten Problems. Von besonderer Bedeutung ist das mathematische Modell, das durch mathematische Gleichungen, Tabellen oder Signalflusspläne dargestellt werden kann und das zeitliche Verhalten der Signale beschreibt. Der Standpunkt einer Systembeschreibung und der damit zu erlangenden Erkenntnis kann sehr unterschiedlich sein. Ein Ingenieur sieht z. B. ein Kraftfahrzeug mit anderen Augen als ein Betriebswirtschaftler, ein Designer oder ein Verkäufer. Der Ingenieur selbst wiederum benutzt unterschiedliche Modelle, je nachdem, ob er sich für die Festigkeit der Karosserie, für den Fahrkomfort oder für das elektronische Motormanagement interessiert.

Die Ableitung von Modellen stützt sich auf zwei grundsätzliche Methoden, nämlich auf die

- theoretische Modellbildung und die
- experimentelle Modellbildung (Identifikation).

Bei der **theoretischen Modellbildung** wird Systemkenntnis vorausgesetzt, mindestens aber die Kenntnis von Hypothesen. Sie wird bevorzugt eingesetzt, wenn der Ansatz von physikalischen, ökonomischen oder anderen Bilanzen möglich ist. Beispiele dafür sind in der

- Mechanik: Impuls-, Drehimpuls-, Arbeitssatz oder die verschiedenen Variationsprinzipie,
- Elektrotechnik: Grundgleichungen für elektromagnetische Felder (Durchflutungsgesetz, Induktionsgesetz usw.) und für elektrische Stromkreise (OHM'sches Gesetz, KIRCHHOFF'sche Sätze usw.).

Die **experimentelle Modellbildung** beruht auf Beobachtungen, d. h. auf Messungen. Sie wird häufig auch als **Identifikation** bezeichnet. Auf der Grundlage von Experimenten erfolgt eine Ermittlung von systembeschreibenden Kennwerten (z. B. von Parametern) oder von Kennfunktionen (z. B. von Übertragungsfunktionen). Das Problem vereinfacht sich, wenn ein Ansatz für die Eingangs–Ausgangs-Beziehung bekannt ist, dann kann das Problem häufig auf eine Parameteridentifikation zurückgeführt werden (vgl. Abschnitt 7.3). In vielen Fällen liegt in der Kombination von theoretischer und experimenteller Modellbildung der Schlüssel zum Erfolg. Das prinzipielle Vorgehen zeigt Bild 1.11.

Sowohl die theoretische als auch die experimentelle Modellbildung sind ohne leistungsfähige Rechentechnik undenkbar. Sie führen über eine Signal- und Prozessanalyse zu dem Systemmodell. Dieses bildet die Grundlage für die Prozesssteuerung. Darunter wird der Entwurf eines Prozesseingriffes verstanden, d. h. die Ermittlung von Stellgrößen mit dem Ziel, eine gewünschte Funktionalität möglichst gut zu erreichen. Weitere Einzelheiten zur Modellbildung sind z. B. in [Nat92, Jan10, Bre88, Ise08] zu finden.

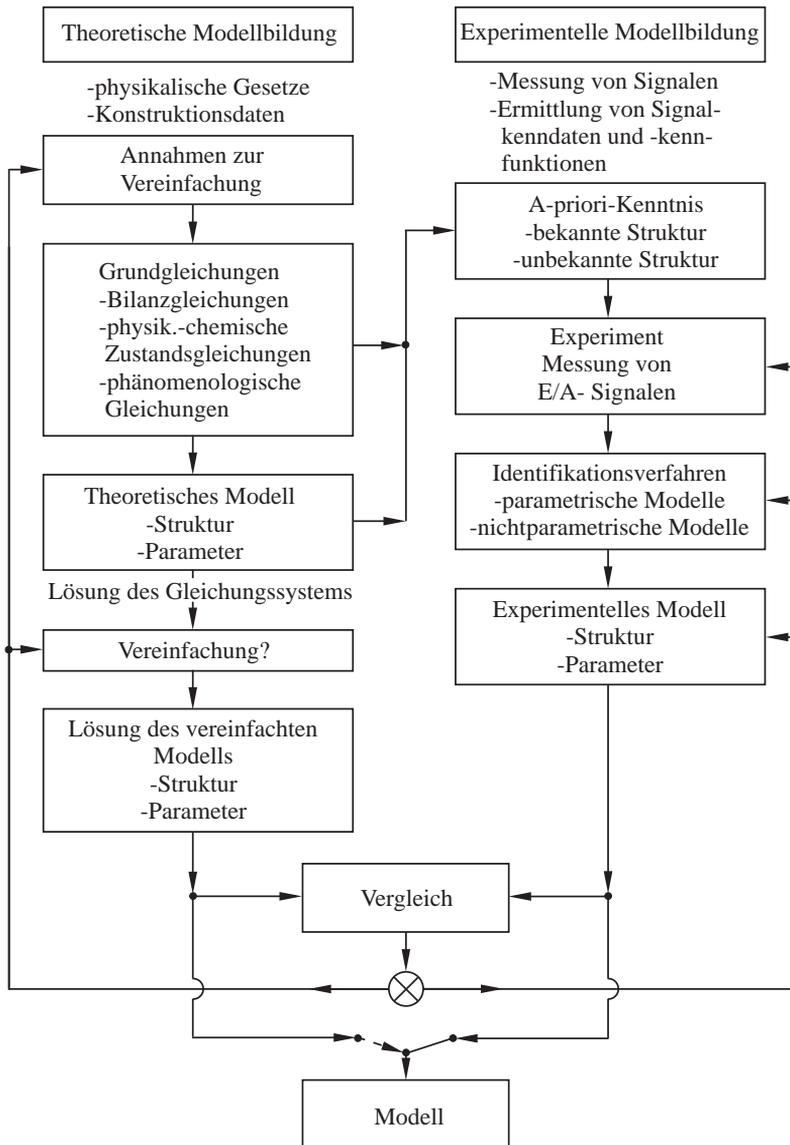


Bild 1.11 Zusammenhang von theoretischer Modellbildung und Identifikation (nach [Nat92]), vgl. auch Abschnitte 7.2 und 7.3

Mechatronische Systeme zeichnen sich u. a. dadurch aus, dass Komponenten ganz unterschiedlicher Bereiche miteinander verknüpft sind. Die in den Bildern 1.2 und 1.3 dargestellte Grundstruktur zeigt diese Vielfalt. Es fällt außerdem auf, dass die dort aufgeführte Struktur sowohl für ein einfaches mechatronisches System (z. B. für die Einzelachsregelung eines Roboters) als auch für komplexe Gesamtsysteme (z. B. für einen mobilen Roboter) Anwendung finden kann.

In Bild 1.12 ist das Prinzip einer modellgestützten Prozesssteuerung schematisch dargestellt.

Die Grundfunktionen, die in mechatronischen Systemen auftreten, lassen sich mit steigender Komplexität wie folgt einteilen:

Funktionen	Beschreibung
Kinematische Funktionen	Darunter wird die Bereitstellung eines geeigneten Bewegungsapparates verstanden, der die geforderte Funktion erfüllt. Diese Aufgabe fällt in das Gebiet der Kinematik (Mechanik, Maschinendynamik, Getriebelehre) und enthält die Geometriebeschreibung des gestellten Problems.
Kinetische Funktionen	Es erfolgt eine Einbeziehung von Kräften und Momenten, die für die Ausführung der gestellten Aufgabe notwendig sind. Dieses Problem kann mithilfe von Bewegungsgleichungen behandelt werden.
Mechatronische Funktionen	Durch Einbindung von Sensorik, Regelungsalgorithmen und Aktorik sowie weiterer Komponenten wird die Funktionsbeschreibung vervollständigt. Häufig führt diese Erweiterung auf die Untersuchung geregelter dynamischer Systeme.

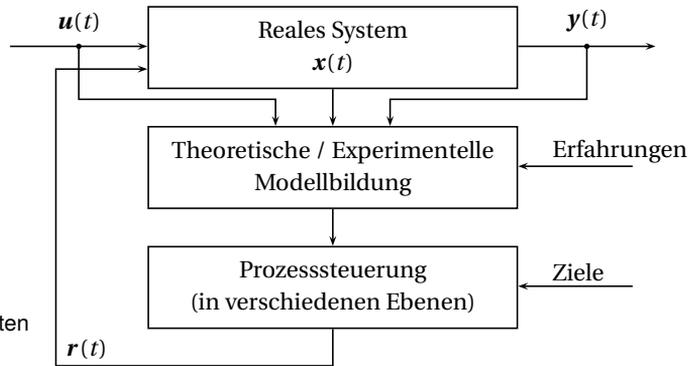


Bild 1.12
Prinzip einer modellgestützten Prozesssteuerung

Gelingt die mathematische Beschreibung der Teilsysteme, die auch **mechatronische Funktionsmodule** genannt werden, beginnt die Untersuchung des Gesamtsystems. Diese besteht z. B. in der Beurteilung der Stabilität in der Umgebung stationärer Betriebspunkte oder in der Untersuchung struktureller Eigenschaften wie die **Steuerbarkeit** und **Beobachtbarkeit** (vgl. Abschnitt 7.1.2). Insbesondere geben Zeitschrittsimulationen Auskunft über die Systemdynamik, z. B. über das Folgeverhalten von Führungsgrößen oder über den Einfluss von Störgrößen. Neben der klassischen Beschreibung von Eingangs-/Ausgangs-Beziehungen im **Zeitbereich** oder bei linearen Systemen durch Anwendung der LAPLACE-Transformation im **Bildbereich** (vgl. Kapitel 7), d. h. mithilfe der **Übertragungsfunktion**, hat sich in der modernen Systemtheorie die Darstellung der Systemgleichungen in **Zustandsform (Zustandsgleichungen)** durchgesetzt. Darunter wird die Beschreibung dynamischer Systeme durch explizite Differentialgleichungen 1. Ordnung der Form

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{n}(t), t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \tag{1.1}$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \tag{1.2}$$

verstanden, mit dem Zustandsvektor $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$, dem Eingangsvektor $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$, dem Störvektor $\mathbf{n}(t) \in \mathbb{R}^n$ und dem Ausgangsvektor $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^f$.

Gleichung (1.1) selbst wird als **Zustandsgleichung** oder **Zustandsraumdarstellung** bezeichnet. Sie wird ergänzt um die **Ausgangsgleichung** (1.2). Der Grund für diese Unterscheidung

besteht darin, dass die Zustandsgrößen nicht immer unmittelbar zugänglich sind oder man nicht an den Zustandsgrößen selbst, sondern am Verhalten bestimmter Beobachterpunkte (Effektorpunkte) interessiert ist. Die Beschreibung dynamischer Systeme in Zustandsraumdarstellung hat die folgenden Vorteile:

- Besonders gute Eignung für numerische Untersuchungen (es existiert eine Fülle von numerischen Integrationsverfahren).
- Neuere Ergebnisse der Systemtheorie, wie Fragen der Steuerbarkeit, der Beobachtbarkeit, der Reglersynthese, des Zustandsbeobachters usw., sind in dieser Systemdarstellung entwickelt worden.
- Der Zustandsvektor $\mathbf{x}(t)$ lässt sich leicht geometrisch deuten. Werden seine Koordinaten als Achsen eines m -dimensionalen Raumes aufgefasst, spannen diese den **Zustandsraum** auf. Der Verlauf von $\mathbf{x}(t)$ in Abhängigkeit von t bildet eine **Trajektorie** im Zustandsraum und wird als Phasenporträt bezeichnet.

Eine vereinfachte Beschreibung ergibt sich für lineare bzw. linearisierte Systeme. Dabei erfolgt die **Linearisierung** häufig um eine Nominallösung (Solllösung). Die linearen Systemgleichungen beschreiben dann das zeitliche Verhalten der als klein angenommenen Abweichungen von der Nominallösung (**Kleinsignalverhalten**). Die Standardform der Zustandsraumdarstellung für lineare Systeme lautet

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{R}(t)\mathbf{n}(t), & \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t).\end{aligned}\tag{1.3}$$

Neben den schon erklärten Größen bedeuten

$\mathbf{A}(t)$ (n, n) –Systemmatrix,

$\mathbf{B}(t)$ (n, m) –Steuermatrix,

$\mathbf{R}(t)$ (n, n) –Störeingriffsmatrix,

$\mathbf{C}(t)$ (r, n) –Ausgangsmatrix (Messmatrix),

$\mathbf{D}(t)$ (r, m) –Durchgangsmatrix (Durchgriffsmatrix).

Die linearisierte Zustandsgleichung besitzt eine große praktische Bedeutung, insbesondere für die Untersuchung von Systemen mit zeitinvarianten Matrizen (**zeitinvariante Systeme**). Häufig kommt der Begriff (LTI = Linear Time Invariant)-Systeme zum Einsatz.

Ausführungen dazu sind in den Kapiteln 6, 7 und 8 enthalten. Man vergleiche dazu auch [Bre88, Lun14, Unb07, Föl13].

■ 1.4 Entwurf mechatronischer Systeme

Bei mechatronischen Systemen besteht eine wesentliche Besonderheit darin, dass Teilsysteme (Komponenten) ganz unterschiedlicher Bereiche miteinander verknüpft werden müssen. Von großer Bedeutung für die Funktionalität des Gesamtsystems ist die Wechselwirkung von mechanischen und digital-elektronischen Komponenten. Während früher sowohl der Entwurf als auch die Realisierung der mechanischen und elektronischen Komponenten weitestgehend unabhängig voneinander vorgenommen wurden, zeichnet sich ein mechatronisches System dadurch aus, dass, mit der Konzeptionsphase beginnend, ein funktionell **integriertes Gesamtsystem** angestrebt wird (Bild 1.13).

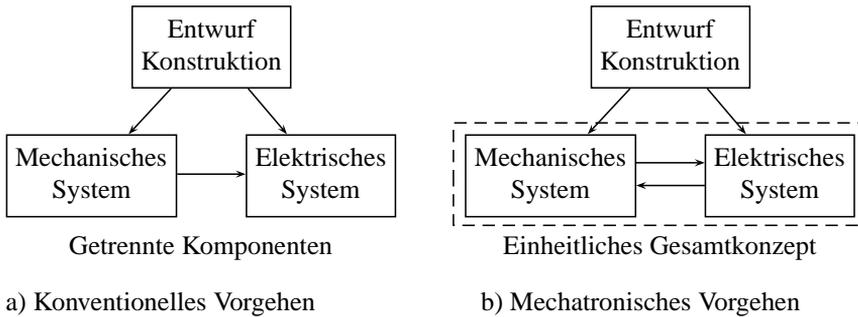


Bild 1.13 Entwurf und Realisierung mechatronischer Systeme (nach [lse08])

Eine Gegenüberstellung einiger wichtiger Unterschiede beim konventionellen und mechatronischen Vorgehen enthält die Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1 Prinzipielle Unterschiede zwischen konventionellem und mechatronischem Entwurf

Konventioneller Entwurf	Mechatronischer Entwurf
Zusammengesetzte Komponenten und damit häufig komplexe Mechanik	Autarke Einheiten, Verlagerung von mechanischen Funktionen in die Software
Präzision durch enge Toleranzen	Präzision durch Messung und Rückführung
Steifer Aufbau	Elastischer Aufbau und damit Leichtbau
Kabelprobleme	Bussysteme
Gesteuerte Bewegung	Programmierbare, geregelte Bewegung
Nicht messbare Größen unbeeinflussbar	Berechnung, Regelung nicht messbarer Größen
Einfache Grenzwertüberwachung	Überwachung mit Fehlerdiagnose

Der Entwurf mechatronischer Systeme erfolgt häufig in der Form, dass zu Beginn Systemstudien angefertigt werden. Das ist notwendig, da es oft eine ganze Reihe von möglichen Alternativlösungen gibt, die bewertet und miteinander verglichen werden müssen. Bei der Auswahl und Realisierung des Konzeptes spielen sowohl **funktionsorientierte** als auch **gestaltorientierte** Überlegungen und Modelle eine wichtige Rolle.

Funktionsorientierte Modelle

Sie müssen die bereits genannten Grundfunktionen (kinematische, kinetische und mechatronische Funktionen) enthalten und dienen zur Beschreibung der Funktion eines mechatronischen Systems. Geometrische und gestaltorientierte Gesichtspunkte spielen dabei in der Regel nur eine eingeschränkte Rolle. Als geeignete Modellklasse für die Behandlung vielfältiger mechatronischer Probleme haben sich **geregelte Mehrkörpersysteme** (MKS) erwiesen. Im einfachsten Fall wird darunter eine offene, kinematische Kette starrer Körper verstanden, die durch Gelenke miteinander verbunden sind und deren Bewegung durch Stellkräfte bzw. -momente aktiv beeinflusst werden kann. Einzelheiten zur Kinematik und Kinetik von MKS werden in Kapitel 6 behandelt. Durch MKS lässt sich im Allgemeinen eine wirklichkeitsnahe Modellierung des Systems erreichen. Diese Modelle werden mit Erfolg für Offline-Berechnungen eingesetzt und dienen zum Nachweis der Funktionalität, ferner für Parameterstudien, zur Bahnplanung, zum Reglerentwurf usw.

Gestaltorientierte Modelle

Sie bilden die Grundlage für den Festigkeitsnachweis und den konstruktiven Entwurf der Teilsysteme eines mechatronischen Gesamtsystems. Benutzt werden dazu CAD- und FEM-Programme (**F**inite **E**lemente **M**ethode) bzw. Kopplungen beider Programme, um eine möglichst realistische Beschreibung der Geometrie und der Festigkeitseigenschaften zu erreichen. Die Funktionalität spielt bei diesen Untersuchungen eine untergeordnete Rolle.

Der Entwurfsvorgang wird durch eine zyklische und sukzessive Verwendung von funktions- und gestaltorientierten Modellen mit entsprechenden Tools (MKS-, FEM-, CAD-Programmen) zu ihrer Untersuchung vorgenommen. Da bei allen Entwicklungen sowohl Funktion als auch Gestalt von Bedeutung sind, kann bei einer Trennung der Methoden und Verfahren nur ein suboptimales Ergebnis erreicht werden.

Ziel ist es deshalb, für den Entwurf einheitliche und integrierte Entwurfswerkzeuge bereitzustellen, die gleichermaßen Funktion und Gestalt berücksichtigen [Wal95].

In diesem Zusammenhang sei die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ erwähnt [VDI04]. Zentraler Punkt dieser Richtlinie ist das V-Modell (Bild 1.14). Aus der Softwareentwicklung entnommen, beschreibt es ein grundsätzliches Vorgehen für die Abfolge wesentlicher Teilschritte beim Entwurf mechatronischer Systeme.

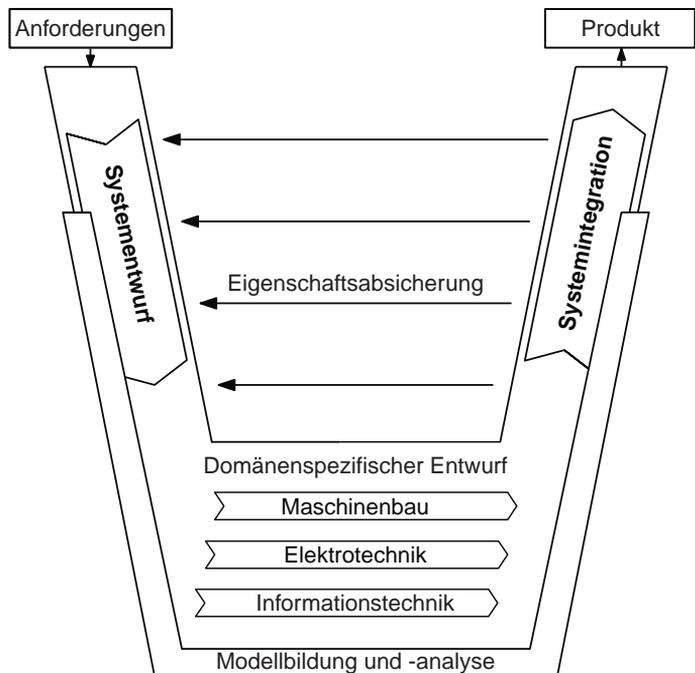


Bild 1.14

V-Modell als Makrozyklus
(nach [VDI04])

Es besteht aus den folgenden Schritten:

- Definition der Anforderungen aus einem konkreten Entwicklungsauftrag,
- Systementwurf, d.h. Entwicklung eines domänenübergreifenden Lösungskonzeptes, verbunden mit der Definition von entsprechenden Teilfunktionen,
- domänenspezifischer Entwurf, d.h. detaillierte Auslegungen und Berechnungen der Teilfunktionen, insbesondere für kritische Systemkomponenten,

- Systemintegration, d. h. Integration der einzelnen Domänen zu einem Gesamtsystem.

Am Ende dieses Prozesses steht schließlich das Produkt. Dabei wird unter Produkt nicht nur das fertige, real existierende Erzeugnis als Ergebnis mit dem höchsten Reifegrad verstanden, sondern auch Labormuster, Funktionsmuster oder Vorserienprodukte.

Abschließend sei noch vermerkt, dass ein komplexes mechatronisches Produkt in der Regel nicht innerhalb eines Makrozyklus entsteht, sondern dass häufig mehrere Durchläufe erforderlich sind.

■ 1.5 Gliederung des Buches

Anhand der zuvor eingeführten allgemeinen Struktur eines mechatronischen Systems (vgl. Bild 1.5), motiviert dieser Abschnitt die Gliederung des Buches und soll eine schnelle Orientierung ermöglichen. Die Inhalte der einzelnen Kapitel können den Blöcken und Signalflüssen gemäß Bild 1.15 zugeordnet werden.

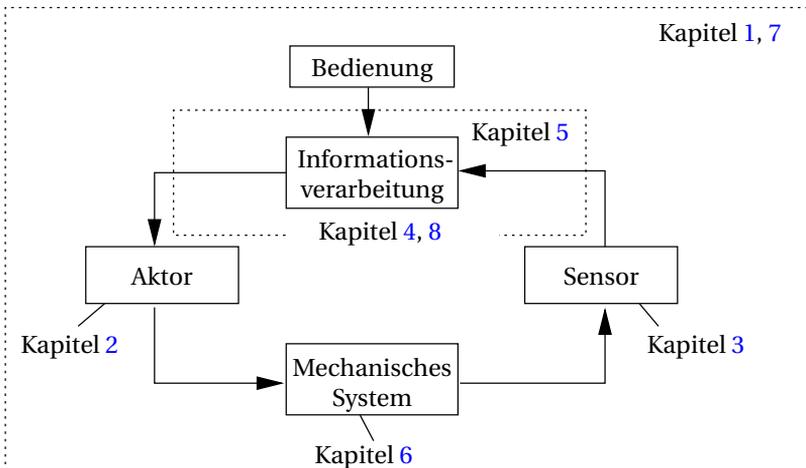


Bild 1.15 Inhalte des Buches – gespiegelt an der Struktur eines mechatronischen Systems

Das vorliegende Kapitel führte die für das weitere Verständnis erforderlichen Begriffe und Grundlagen ein. Zu nennen sind insbesondere System, Prozess und die allgemeine Struktur eines mechatronischen Systems mit den verbindenden Signalflüssen.

Kapitel 2 widmet sich unterschiedlichen Aktoren – wobei aufgrund der Vielzahl von Wirkprinzipien nur eine Auswahl getroffen werden kann. Neben klassischen, konventionellen elektromechanischen sowie fluidischen Antrieben, die einen wesentlichen Anteil der zum Einsatz kommenden Stellglieder abdecken, werden auch neuartige Antriebe wie bspw. Piezoaktoren und deren Funktionsweise vorgestellt. Zusätzlich zu den physikalischen Wirkprinzipien behandeln die jeweilige Abschnitte auch die mathematische Modellierung der Antriebe sowie wesentliche Kenngrößen.

Wie aus Bild 1.15 ersichtlich, erfassen Sensoren den Zustand eines Systems und stellen diese Information zur Weiterverarbeitung zu Verfügung. Kapitel 3 geht nach einer kurzen Ein-

führung auf verschiedenste Sensoren und deren Messprinzipien ein. Wie schon in Kapitel 2 erfolgt neben einer Darstellung der physikalischen Grundlagen ebenso deren mathematische Beschreibung. Auch hier kann aufgrund der Fülle nur eine kleiner Ausschnitt behandelt werden.

Wesentlicher Bestandteil eines mechatronischen Systems sind Signale und deren Verarbeitung. Kapitel 4 behandelt daher Methoden zur Darstellung und Verarbeitung zeitdiskreter und zeitkontinuierlicher Signale, sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich. Ebenso werden Vorschriften zur Auslegung von Filtern für unterschiedlichste Einsatzzwecke vorgestellt.

Gegenstand von Kapitel 5 ist die Bearbeitung der Prozessdaten. Losgelöst von der konkreten Rechnerarchitektur werden Grundlagen einer die Rechnerleistung voll ausschöpfenden zeit- bzw. ereignisgebundene Programmierung (Multitasking) behandelt. Das Kapitel schließt mit Ausführungen über (verteilte) Sensor-/Aktornetze und einem Schema zur Bewertung von Echtzeitbetriebssystemen. Letzteres gibt konkrete Hinweise zu deren Auswahl zu Beginn eines Entwicklungsprozesses.

Die Aktoren des mechatronischen Systems wirken auf die Mechanik, die die gewünschte Bewegung ausführt und ggf. mit der Umgebung interagiert. Daher nimmt die mechanische Modellierung von Mehrkörpersystemen eine herausragende Stellung ein. Kapitel 6 stellt die erforderlichen Grundlagen vor, behandelt die Kinematik offener und geschlossener Ketten und schließt mit einer Betrachtung der für eine Bewegung erforderlichen Kräfte und Momente (Kinematik).

Die nun folgenden Teile betrachten das mechatronische System in seiner Gesamtheit (Kapitel 7) und widmen sich dessen Regelung (Kapitel 8).

Kapitel 7 führt zunächst mit dem Klemmenmodell und dem Zustandsraummodell geeignete Methoden zur Beschreibung dynamischer Systeme ein und behandelt wichtige Struktureigenschaften. Hiermit lassen sich die einzelnen Teilmodelle (z. B. Sensor, Aktor, Mechanik) zu einem großen, ggf. stark nichtlinearen System mit verteilten Parametern zusammenfassen. Daher folgen Methoden zur Modellvereinfachung. Da bei der Modellierung mechatronischer Systeme sowohl die zugrunde liegenden Gleichungen als auch deren Parameter zum Teil unbekannt sind, schließen sich die Parameter- und Systemidentifikation an. Neben der Theorie findet insbesondere auch die Darstellung von Aspekten aus der Praxis Berücksichtigung. Als Ergebnis resultiert ein vollständig identifiziertes mathematisches Modell mit reduzierter Komplexität, das das wesentliche Verhalten des mechatronischen Systems wiedergibt.

Dieses ist die Grundlage für die in Kapitel 8 behandelten Regelungsverfahren. Ausgehend von Entwurfszielen für die Reglerauslegung werden die gängigen Vorzugslösungen zur Regelung linearer Systeme behandelt. Da die Implementierung und Ausführung im Allgemeinen digital auf einem (Prozess)-Rechner erfolgt, geht Kapitel 8 insbesondere auch auf die Besonderheiten der digitalen Regelung ein und endet mit ausgewählten Aspekten zur Implementierung.

Wie der knappen Darstellung wesentlicher Inhalte des vorliegende Buches zu entnehmen ist, handelt es sich bei der Mechatronik um eine stark interdisziplinäre Fachrichtung innerhalb der Ingenieurwissenschaften. Sie erfordert tiefgreifendes Verständnis ausgewählter Aspekte des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Informationsverarbeitung sowie deren Wechselwirkungen und stellt daher hohe fachliche Anforderungen an die Ingenieure. Dies macht aber auch gerade den Reiz der Mechatronik aus!

2

Aktoren

Aktoren oder Stelleinrichtungen (engl.: actuator) sind wichtige Komponenten mechatronischer Systeme. Vergleicht man sie mit einem Menschen, so stellen sie die Muskeln dar, die zur Ausführung von Bewegungen oder zum Aufbringen von Kräften erforderlich sind. Ihre Ansteuerung erfolgt durch das Gehirn (Prozessrechner) und ihre Funktionsfähigkeit erfordert eine entsprechende Durchblutung (Hilfsenergie). Gemäß der aus der Einleitung bekannten Struktur eines allgemeinen mechatronischen Systems, befindet sich der Aktor an der Grenze zwischen Informations- und Energie-/Materiefluss, vgl. Bild 2.1. Er wandelt die Stellgrößen unter Einsatz der Hilfsenergieversorgung in eine Bewegung des mechatronischen Systems.

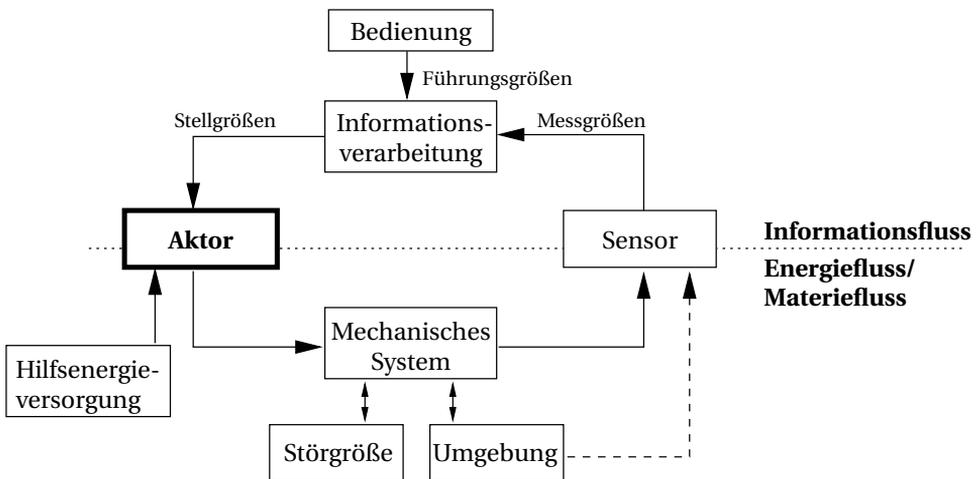


Bild 2.1 Der Aktor an der Grenze zwischen Informations- und Energie-/Materiefluss (nach [lse08])

Im Folgenden werden zunächst allgemein der Aufbau und die Wirkungsweise der Aktoren beschrieben und Wege zur Modellbildung aufgezeigt. Anschließend erfolgt im Einzelnen die Darstellung der wichtigsten Aktoren getrennt nach ihren Wirkprinzipien. Andere Darstellungsformen sind durchaus denkbar. Beispielsweise ist eine Einteilung der Aktoren nach ihrer Hauptaufgabe als Weg- bzw. Kraftaktoren ähnlich wie bei Sensoren möglich. Die hier gewählte Darstellung soll einerseits die physikalischen Grundlagen betonen und andererseits die Modellbildung erleichtern. Dabei wird weder Vollständigkeit noch erschöpfende Tiefe angestrebt, beides würde den hier gesteckten Rahmen sprengen. Als weiterführende Literatur seien [Jan04], [JJ97], [Kal03], [SBT94], [Sta95], [SB87] genannt sowie die Berichtsbände der Kongressreihe „Actuator“.

Das Aktoren-Kapitel gliedert sich wie folgt: Allgemeingültige Betrachtungen, unabhängig vom jeweiligen Wandlerprinzip, sowie Begriffsdefinitionen sind Gegenstand von Abschnitt 2.1. Aufbau und Wirkprinzipien elektromechanischer Aktoren werden in Abschnitt 2.2 behandelt, wobei für die beiden Klassen elektromagnetischer und elektrodynamischer Wandler sowohl die