

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 Neugestaltung des ursprünglich von ULRICH SCHMUCKER verfassten Kapitels trägt 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, namentlich 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 (auf Buch-Homepage)	399
9.1	Auto-Tuning eines elektromechanischen Systems mittels EKF	
9.2	Funktionsentwicklung und Applikation in der MSG-Entwicklung	
9.3	Zustandsregelung zeitvarianter Systeme am Beispiel einer Drosselklappe	
9.4	Deltaroboter mit PLCopen Funktionsbausteinen.....	
9.5	Visual Servoing zur mechanischen Unkrautregulierung mit einem Feldroboter.	
9.6	Inertiale Stabilisierung einer Lastkarre mit Momentenkreiseln	
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