

Rolf Isermann

Mechatronische Systeme

Rolf Isermann

Mechatronische Systeme

Grundlagen

2. vollständig neu bearbeitete Auflage

Mit 327 Abbildungen und 103 Tabellen

 Springer

Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann
TU Darmstadt
Institut für Automatisierungstechnik
Landgraf-Georg-Str. 4
D-64283 Darmstadt

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

ISBN 978-3-540-32336-5 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 3-540-43129-2 1. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York

e-ISBN 978-3-540-32512-3
DOI 10.1007/978-3-540-32512-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 2002, 2008

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. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Satz: Digitale Druckvorlage des Autors
Herstellung: LE- \TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Einbandgestaltung: eStudioCalamar S.L., F. Steinen-Broo, Girona, Spanien

SPIN 10817865 7/3180/YL – 5 4 3 2 1 0 Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Mechatronische Systeme entstehen durch Integration von vorwiegend mechanischen Systemen, elektronischen Systemen und zugehöriger Informationsverarbeitung. Wesentlich sind dabei die Integration der einzelnen mechanischen und elektronischen Elemente, die dadurch mögliche Erweiterung von Funktionen und die Erzielung synergetischer Effekte. Die Integration kann örtlich durch den Aufbau und funktionell durch die digitale Elektronik erfolgen. Die örtliche Integration erfolgt dabei im Wesentlichen durch die konstruktive Verschmelzung von Aktoren, Sensoren und der Mikroelektronik mit dem Prozess, also durch die Hardware. Die funktionelle Integration wird jedoch entscheidend durch die Informationsverarbeitung und damit durch die Gestaltung der Software geprägt. Hierbei werden gemessene Signale und Bedieneingaben verarbeitet und es werden Stellelemente so angesteuert, dass Gesamtsysteme mit einer gewissen künstlichen Intelligenz entstehen. Diese Entwicklung zu mechatronischen Gesamtsystemen beeinflusst die Gestaltung moderner elektro-mechanischer Komponenten, Maschinen, Fahrzeuge und feinmechanischer Geräte.

Das vorliegende Buch gibt eine Einführung in

- Entwurf und Aufbau mechatronischer Systeme
- Methodik der theoretischen Modellbildung technischer Systeme
- Mathematische Modelle mechanischer Bauelemente, elektrischer Antriebe und Maschinen
- Methoden der experimentellen Modellbildung dynamischer Prozesse und Signale
- Übersicht verschiedener Sensoren
- Übersicht verschiedener Aktoren, Modelle von elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Aktoren
- Übersicht zu Mikrorechnern und Bussystemen

Im einführenden ersten Kapitel wird zunächst der prinzipielle *Aufbau integrierter mechanisch-elektronischer Systeme* betrachtet. Dann wird der Einfluss der Mechatronik auf die Entwicklung verschiedener Produkte aus den Bereichen mechanischer Komponenten, Kraft- und Arbeitsmaschinen, Fahrzeuge, Feinmechanik und Mikro-mechanik gezeigt. Es folgt eine Übersicht der verschiedenen Funktionen und der

Integrationsarten bei mechatronischen Systemen. Von großem Einfluss auf die Gestaltung ist eine *systematische Entwurfsmethodik* mit einem Zweig Systementwurf und einem Zweig Systemintegration, den zugehörigen Werkzeugen, Prototypstadien und Versuchsaufbauten. Da die Realisierung der integrierten Informationsverarbeitung im Allgemeinen eine genaue Kenntnis der statischen und dynamischen Zusammenhänge von Ein- und Ausgangsgrößen voraussetzt, sind zum Entwurf mathematische Modelle, verschiedene Simulationsverfahren, rechnergestützte Entwurfsmethoden und experimentelle Versuchstechniken erforderlich.

Im Teil I des Buches werden zuerst die *Grundlagen der Modellbildung* für das statische und dynamische Verhalten in allgemeiner Form nach einer einheitlichen Methodik beschrieben. Dann wird im Teil II die *Modellbildung für mechanische Systeme* mit bewegten Massen für eine Auswahl mechanischer Bauelemente und Mehrmassensysteme behandelt. Es schließt sich die *Modellbildung elektrischer Antriebe* in Form von Elektromagneten und verschiedener Elektromotoren an. Aufgrund der Modelle dieser Komponenten können dann mathematische Modelle für *Maschinen* gebildet und ihr statisches und dynamisches Verhalten analysiert werden. Der Teil III behandelt Methoden der *experimentellen Modellbildung*. Die Identifikation und Parameterschätzung mathematischer Modelle aufgrund gemessener Signale und die Erfassung von Schwingungen dienen zur Online-Informationsgewinnung über den Prozess.

Im Teil IV werden die *Komponenten der Online-Informationsverarbeitung* in Form wichtiger Sensoren und elektrischer, hydraulischer und pneumatischer Aktoren systematisch beschrieben und ihre Eigenschaften und Leistungsbereiche angegeben. Es folgt ein Kapitel über den grundsätzlichen Aufbau von Mikrorechnern, speziellen Mikroprozessoren und Bussystemen. Die angegebenen technischen Daten sollen auch hier einen Überblick für die Leistung der jeweiligen Komponenten geben. Schließlich werden noch fehlertolerante mechatronische Systeme betrachtet, die durch entsprechende Redundanz trotz auftretender Fehler oder Störungen einen weiteren Betrieb ermöglichen.

Mit Hilfe dieser Grundlagen zur Modellierung und Übersicht der Komponenten mechatronischer Systeme kann die Informationsverarbeitung durch digitale Steuerungen, Regelungen, Überwachung mit Fehlerdiagnose und Optimierung realisiert werden (welche in anderen Büchern beschrieben werden). Dabei werden erste Schritte in Richtung intelligenter Systeme möglich, wie z.B. bei Aktoren, Robotern, aktiven Dämpfersystemen, Magnetlagern, Werkzeugmaschinen, Verbrennungsmotoren und Kraftfahrzeugen zu beobachten.

Das vorliegende Buch ist aufgrund von mehreren Forschungsarbeiten entstanden und entspricht einer Vorlesung „Mechatronische Systeme“, die ab dem Sommersemester 1992 an der Technischen Universität Darmstadt gehalten wurde. Einige Teile stammen auch aus Ergebnissen des DFG-Sonderforschungsbereiches „Neue integrierte mechanisch-elektronische Systeme (IMES)“, in dem von 1988 bis 2001 an der TU Darmstadt mehrere Institute der Elektrotechnik und des Maschinenbaus zusammenarbeiteten. Das Buch richtet sich an Studenten der Elektrotechnik, des Maschinenbaus und der Informatik und an Ingenieure in Forschung und Praxis.

Der Verfasser dankt besonders seinen Mitarbeitern, die in mehrjähriger Zusammenarbeit an dem Zustandekommen mehrerer Kapitel der ersten Auflage 1998 (und Studienausgabe 2002) beteiligt sind. Hierbei möchte ich besonders erwähnen: Dr.-Ing. Mihar Ayoubi, Dr.-Ing. Jochen Bußhardt, Dr.-Ing. Susanne Töpfer, Dr.-Ing. Christoph Halfmann, Dr.-Ing. Henning Holzmann, Dr.-Ing. Jens Achim Kessel, Dr.-Ing. Oliver Nelles, Dipl.-Ing. Dieter Neumann, Dr.-Ing. Martin Schmidt, Dr.-Ing. Matthias Schüler, Dr.-Ing. Ralf Schwarz, Dipl.-Ing. Thomas Weispfenning.

2003 erschien eine englische Ausgabe (2005 als Softbound) mit wesentlichen Erweiterungen mit Bezug auf die Entwicklungsmethodik, verschiedene mechanische Komponenten, Drehstrommotoren, Modellbildung von Maschinen, Sensoren, hydraulische und pneumatische Aktoren, fehlertolerante Systeme und Aufgabensammlungen zu den Kapiteln.

Diese 2. deutsche Ausgabe ist eine vollständige Überarbeitung der 1. Auflage und berücksichtigt die wichtigsten Ergänzungen der englischen Version und weitere Entwicklungen des Gebietes. Für die Unterstützung bei einzelnen Abschnitten danke ich mehreren Mitarbeitern sehr, wie Dr.-Ing. Armin Wolfram für Abschnitt 5.4 über Drehstrommotoren und für 5.6 über Leistungselektronik; Dr.-Ing. Jochen Schaffnit für 6.7 über Kraftfahrzeug-Antriebsstrang; Dr.-Ing. Frank Kimmich für 8.2.7 über Drehzahlanalyse; Dr.-Ing. Karsten Spreitzer für Teile von Kapitel 9 über Sensoren und Dr.-Ing. Marco Münchhof für Teile von Kapitel 10 über Aktoren. Herrn Dr.-Ing. Thomas Hollstein vom Fachgebiet Mikroelektronische Systeme (TUD) danke ich für die Durchsicht des Kapitels 11 über Mikrorechner.

Für die arbeitsintensive, sorgfältige Gestaltung des Textes, der Bilder und Tabellen danke ich sehr Frau Brigitte Hoppe.

Sommer 2007

Rolf Isermann

Inhaltsverzeichnis

1	Integrierte mechanisch-elektronische Systeme	1
1.1	Vom mechanischen zum mechatronischen System	1
1.2	Mechanische Systeme und mechatronische Entwicklungen	8
1.2.1	Mechatronische Systeme des Maschinenwesens	8
1.2.2	Mechatronische Systeme in der Feingerätetechnik	15
1.2.3	Mechanische Systeme des Apparatebaus (Anlagentechnik)	17
1.2.4	Mikromechatronische Systeme	17
1.2.5	Eingrenzung und Definition mechatronischer Systeme	18
1.3	Funktionen mechatronischer Systeme	19
1.3.1	Mechanischer Grundaufbau	19
1.3.2	Funktionsaufteilung Mechanik - Elektronik	20
1.3.3	Betriebseigenschaften	21
1.3.4	Neue Funktionen	21
1.3.5	Sonstige Entwicklungen	22
1.4	Integrationsformen von Prozess und Elektronik	22
1.5	Arten der Informationsverarbeitung	25
1.5.1	Mehr-Ebenen-System	25
1.5.2	Signalvorverarbeitung	27
1.5.3	Informationsgewinnung	27
1.5.4	Modellgestützte Methoden der Regelung	29
1.5.5	Überwachung und Fehlerdiagnose	29
1.5.6	Intelligente Systeme	30
1.6	Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme	33
1.7	Rechnergestützter Entwurf mechatronischer Systeme	40
1.8	Zum Inhalt dieses Buches	41

Teil I Grundlagen der Modellbildung

2	Grundlagen der theoretischen Modellbildung technischer Prozesse . .	47
2.1	Theoretische und experimentelle Modellbildung	47
2.2	Klassifikation von Prozesselementen	51
2.2.1	Materieformen	51
2.2.2	Hauptstrom und Nebenströme	52
2.2.3	Prozesselemente für konzentrierte Parameter	54
2.2.4	Prozesselemente für verteilte Parameter	59
2.3	Grundgleichungen für Prozesselemente mit Energie- und Materieströmen	59
2.3.1	Bilanzgleichungen	61
2.3.2	Konstitutive Gleichungen	65
2.3.3	Phänomenologische Gleichungen	84
2.4	Energiebilanzgleichungen für Prozesse mit konzentrierten Parametern	89
2.4.1	Energiebilanz bei mechanischen Systemen	89
2.4.2	Energiebilanz bei thermischen Systemen (feste Körper, Flüssigkeiten)	94
2.4.3	Energiebilanz für Gase und Dämpfe	95
2.4.4	Energiebilanz bei elektrischen Systemen	100
2.4.5	Gemeinsame Eigenschaften der Bilanzgleichungen	101
2.5	Verschaltung von Prozesselementen	104
2.5.1	Knotengleichung und Umlaufgleichung	104
2.5.2	Zur Kausalität von Prozesselementen	107
2.6	Analogien zwischen mechanischen und elektrischen Systemen	110
2.7	Zusammenfassung	112
2.8	Aufgaben	116
3	Grundgleichungen für die Dynamik mechanischer Systeme mit bewegten Massen	119
3.1	Newton'sche Grundgesetze der Kinetik	120
3.1.1	Translation	120
3.1.2	Rotation	121
3.2	Prinzipien der Mechanik	123
3.2.1	Das Prinzip von d'Alembert	124
3.2.2	Lagrangische Gleichungen 2. Art	126
3.3	Aufgaben	132

Teil II Modelle mechanischer und elektrischer Komponenten und Maschinen

4	Modelle mechanischer Komponenten	135
4.1	Stäbe	135
4.2	Federn	138
4.3	Dämpfer	141
4.3.1	Dämpfer mit trockener und viskoser Reibung	141
4.3.2	Feder-Dämpfer-Systeme	142
4.4	Lager	145
4.4.1	Gleitlager	145
4.4.2	Wälzlager	145
4.5	Einmassenschwinger (Feder-Masse-Dämpfer-Systeme)	149
4.5.1	Längsschwinger	150
4.5.2	Drehschwinger	155
4.6	Mehrmassenschwinger	156
4.6.1	Zweimassen-Drehschwinger mit einer Feder	156
4.6.2	Zweimassen-Drehschwinger mit zwei Federn	162
4.6.3	Zweimassen-Drehschwinger mit Getriebe und einer Feder ..	164
4.6.4	Getriebebauarten	168
4.6.5	Riemengetriebe	173
4.6.6	Tilger und Dämpfer	180
4.7	Mechanische Systeme mit Reibung	181
4.8	Mechanische Systeme mit Lose (Spiel)	185
4.9	Aufgaben	187
5	Modelle elektrischer Antriebe	189
5.1	Bauarten elektrischer Antriebe	189
5.2	Elektromagnete	191
5.2.1	Bauformen von Elektromagneten	191
5.2.2	Magnetisches Feld	192
5.2.3	Statisches Verhalten von einfachen Magnetkreisen	194
5.2.4	Dynamisches Verhalten von einfachen Magnetkreisen	196
5.2.5	Statisches Verhalten von Elektromagneten	197
5.2.6	Dynamisches Verhalten von Elektromagneten und Positions-Regelung	201
5.3	Gleichstrommotoren (DC)	204
5.3.1	Induzierte Spannung	208
5.3.2	Drehmomenterzeugung	208
5.3.3	Dynamisches Verhalten	209
5.3.4	Statisches Verhalten	214
5.3.5	Drehzahl- und Positions-Regelung	216
5.3.6	Bürstenlose Gleichstrommotoren (elektronische Kommutierung)	218
5.3.7	Besondere Bauarten von Gleichstrommotoren	222

5.4	Drehstrommotoren (AC)	227
5.4.1	Drehfelder und Koordinatensysteme	227
5.4.2	Asynchronmotoren	237
5.4.3	Synchronmotoren	254
5.5	Wechselstrommotoren	259
5.5.1	Kommutatormotoren (Universalmotoren)	260
5.5.2	Kurzschlussrotormotoren	260
5.5.3	Fremdgeführte und selbstgeführte Elektromotoren	263
5.6	Leistungselektronik	264
5.6.1	Bauelemente der Leistungselektronik	264
5.6.2	Schaltungen der Leistungselektronik	265
5.7	Aufgaben	273
6	Modelle von Maschinen	275
6.1	Kopplung von Maschinenelementen zu Maschinen	277
6.2	Kennlinien und Stabilität von Maschinen	284
6.3	Statisches Verhalten von Kraft- und Arbeitsmaschinen	293
6.4	Dynamisches Verhalten eines Motorenprüfstandes	298
6.5	Dynamisches Verhalten eines Werkzeugmaschinen-Vorschubantriebs	304
6.5.1	Der Vorschub und seine Komponenten	304
6.5.2	Experimentelle Identifikation des Vorschubantrieb-Regelsystems	306
6.6	Dynamisches Modell eines Drehstrommotor-Kreiselpumpen-Aggregates	307
6.6.1	Theoretisches Modell der Kreiselpumpe	308
6.6.2	Gesamtmodell der Pumpanlage und ihre Identifikation	310
6.7	Dynamisches Modell eines Kraftfahrzeug-Antriebsstranges	315
6.7.1	Komponenten des Antriebsstranges	315
6.7.2	Antriebsstrangmodell mit Wellenelastizität	316
6.8	Abhängigkeit des Verhaltens vom Betriebspunkt	319
6.8.1	Speicher ohne und mit Rückführung	319
6.8.2	Einstellung von Reglerparametern	322
6.9	Zur Regelung mechatronischer Systeme	322
6.9.1	Regelungen der unteren Ebene	323
6.9.2	Regelungen der höheren Ebenen	325
6.9.3	Adaptive Regelung	326
6.9.4	Fuzzy Regelung	326
6.10	Aufgaben	327

Teil III Methoden der experimentellen Modellbildung

7	Identifikation dynamischer Systeme (experimentelle Modellbildung)	333
7.1	Identifikationsmethoden	333
7.1.1	Allgemeines Vorgehen	333
7.1.2	Klassifikation von Identifikationsmodellen	335
7.1.3	Identifikationsmethoden	335
7.1.4	Testsignale	335
7.1.5	Geschlossener Regelkreis	339
7.1.6	Art der Anwendung	339
7.2	Parameterschätzung für zeitdiskrete Signale	339
7.2.1	Methode der kleinsten Quadrate (LS)	340
7.2.2	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate	343
7.2.3	Modifikation der Methode der kleinsten Quadrate	343
7.3	Parameterschätzung für zeitkontinuierliche Signale	344
7.3.1	Methode der kleinsten Quadrate	344
7.4	Zeitvariante Systeme	346
7.5	Nichtlineare Prozesse	348
7.5.1	Parameterschätzung mit klassischen nichtlinearen Modellen	348
7.5.2	Künstliche neuronale Netze	349
7.5.3	Fuzzy-logische Modelle	363
7.5.4	Kennfeld-Darstellungen für nichtlineares statisches Verhalten	366
7.5.5	Parameterschätzung für nicht stetig differenzierbare nichtlineare Prozesse (Reibung und Lose)	368
7.6	Aufgaben	372
8	Modelle von periodischen Signalen und ihre Identifikation	375
8.1	Harmonische Schwingungen	375
8.1.1	Einzelne Schwingungen	375
8.1.2	Superposition	376
8.1.3	Amplitudenmodulation	376
8.1.4	Frequenz- und Phasenmodulation	377
8.1.5	Schwebung	378
8.1.6	Superposition und nichtlineare Kennlinien	380
8.2	Identifikation periodischer Signale (Schwingungsanalyse)	381
8.2.1	Bandpassfilter	382
8.2.2	Fourieranalyse	383
8.2.3	Korrelationsfunktionen	384
8.2.4	Fouriertransformation (zeitbegrenzte Signale)	385
8.2.5	Schnelle Fouriertransformation (FFT)	387
8.2.6	Parametrische Spektralschätzung	391
8.2.7	Cepstrumanalyse	393
8.2.8	Analyse nichtstationärer periodischer Signale	395

8.3	Schwingungsanalyse für Maschinen	399
8.3.1	Schwingungen rotierender Maschinen	399
8.3.2	Zur Anwendung der Schwingungsanalysemethoden	404
8.4	Aufgaben	407

Teil IV Komponenten der Online-Informationsverarbeitung

9	Sensoren	413
9.1	Messkette	413
9.2	Klassifikation von Sensoren	414
9.3	Eigenschaften von Sensoren	415
9.4	Signalformen, Messumformer, Messverstärker	416
9.5	Wegmessung	418
9.6	Geschwindigkeitsmessung	421
9.7	Beschleunigungsmessung	422
9.8	Schwingungsmessung	425
9.9	Kraft- und Druckmessung	425
9.10	Drehmomentmessung	427
9.11	Temperaturmessung	427
9.12	Durchflussmessung	428
9.13	Analog-Digital-Wandlung	434
9.14	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	435
9.15	Integrierte und intelligente Sensorik	436
9.16	Aufgaben	438
10	Aktoren	441
10.1	Grundstrukturen von Aktoren	442
10.2	Übersicht der Aktoren	444
10.2.1	Art der Hilfsenergie	445
10.2.2	Art des Übertragungsverhaltens	446
10.2.3	Anforderungen an Aktoren und Servoantriebe	450
10.3	Elektromechanische Stellantriebe	450
10.3.1	Elektromotoren als Stellantriebe	452
10.3.2	Elektromagnete	460
10.4	Hydraulische Aktoren	461
10.4.1	Hydraulische Stellantriebe	462
10.4.2	Hydraulische Komponenten und ihre Modelle	464
10.4.3	Modell einer servo-hydraulischen Achse	478
10.5	Pneumatische Aktoren	483
10.5.1	Pneumatische Stellsysteme	483
10.5.2	Pneumatische Komponenten und ihre Modelle	487
10.5.3	Modellbasierte Regelung einer pneumatischen Servoachse ..	497
10.5.4	Modelle eines pneumatischen Stellventils	500

10.6	Unkonventionelle Aktoren	501
10.6.1	Aktoren mit Umgebungsenergie	503
10.6.2	Aktoren mit elektro-rheologischen und magneto-rheologischen Flüssigkeiten	504
10.6.3	Piezoelektrische Aktoren	504
10.6.4	Elektrostriktive und magnetostriktive Aktoren	508
10.6.5	Mikroaktoren	509
10.7	Vergleich der Anwendungsbereiche	509
10.8	Aktoren als Systemkomponenten	513
10.8.1	Schnittstellen	513
10.8.2	Bauliche Integration mit dem Prozess	513
10.8.3	Ausgeführte Funktionen	513
10.9	Aufgaben	514
11	Mikrorechner	517
11.1	Aufbau eines Mikrorechners	518
11.2	Standardprozessoren	519
11.2.1	Architektur von Standardprozessoren	522
11.2.2	Software für Standardprozessoren	525
11.3	Speicher	527
11.4	Schnittstellen zum Prozess (Prozessperipherie)	531
11.4.1	Analoge Eingaben	532
11.4.2	Digitale und binäre Eingaben	534
11.4.3	Analoge Ausgaben	535
11.4.4	Digitale und binäre Ausgaben	536
11.5	Mikrocontroller	536
11.5.1	Architektur von Mikrocontrollern	537
11.5.2	Software für Mikrocontroller	540
11.6	Signalprozessoren	541
11.7	Anwendungsspezifische Prozessoren (ASIC)	542
11.8	Feldbussysteme	545
11.8.1	Netztopologien	545
11.8.2	Busgrundfunktionen	547
11.8.3	OSI (Open System Interconnection) – Referenzmodell	547
11.8.4	Profibus	549
11.8.5	CAN-Bus	553
11.8.6	FlexRay-Bus	556
11.9	Aufgaben	559
12	Fehlertolerante mechatronische Systeme	561
12.1	Zum Ausfallverhalten der Komponenten	562
12.1.1	Fehlerarten	562
12.1.2	Zuverlässigkeits- und Sicherheits-Analyse	563
12.2	Fehlertoleranz-Strukturen	565
12.2.1	Grundsätzliche redundante Strukturen	566

12.2.2	Degradationsstufen	568
12.2.3	Fehlermanagement	569
12.3	Methoden der Fehlererkennung	570
12.4	Fehlertolerante Sensoren	571
12.4.1	Hardware-Sensor-Redundanz	571
12.4.2	Analytische-Sensor-Redundanz	572
12.5	Fehlertolerante Aktoren	572
12.6	Beispiele fehlertoleranter Systeme	574
12.6.1	Elektrischer Drosselklappen-Aktor	575
12.6.2	Redundanter Asynchronmotor-Antrieb	578
12.6.3	Brake-by-wire System	583
12.7	Schlussbemerkungen	584
12.8	Aufgaben	584
13	Ausblick	587
	Literaturverzeichnis	591
	Sachverzeichnis	617

List of symbols

Es werden nur häufig vorkommende Abkürzungen und Symbole angegeben.

Buchstaben-Symbole

<i>a</i>	Parameter von Differential- oder Differenzgleichungen
<i>b</i>	Parameter von Differential- oder Differenzgleichungen
<i>c</i>	Federkonstante, Konstante, Konzentration, Steifigkeit
<i>d</i>	Dämpfungskoeffizient, Durchmesser
<i>e</i>	Gleichungsfehler, Potentialdifferenz, Regeldifferenz $e = w - y$, Zahl $e = 2,71828\dots$
<i>f</i>	Frequenz ($f = 1/T_p$, T_p Schwingungsdauer), Funktion $f(\dots)$, Strom (flow)
<i>g</i>	Erdbeschleunigung, Funktion $g(\dots)$, Gewichtsfunktion
<i>h</i>	Höhe, Nachgiebigkeit, spezielle Enthalpie
<i>i</i>	ganze Zahl, Getriebeübersetzungsverhältnis, Index, $\sqrt{-1}$ (ima- ginäre Einheit)
<i>j</i>	ganze Zahl, Index
<i>k</i>	diskrete Zahl, diskrete Zeit $k = t/T_0 = 0,1,2,\dots$
<i>l</i>	Index, Länge
<i>m</i>	Masse, Ordnungszahl
<i>n</i>	Drehzahl, Ordnungszahl, Störsignal
<i>p</i>	Druck, Index
<i>q</i>	verallgemeinerte Koordinaten, Wärmemenge (bezogen)
<i>r</i>	Index, Radius
<i>s</i>	Dicke, Laplace-Variable $s = \delta + i\omega$, Schlupf, spezielle Entropie, Umfang
<i>t</i>	kontinuierliche Zeit
<i>u</i>	Eingangssignaländerung ΔU , innere Energie
<i>v</i>	Geschwindigkeit, spezifisches Volumen
<i>w</i>	Führungsgröße, Geschwindigkeit
<i>x</i>	Raumkoordinate, Zustandsvariable

y	Ausgangsgrößenänderung ΔY , Raumkoordinate, Regelgrößenänderung ΔY , Signal
z	Raumkoordinate, Störgrößenänderung ΔZ , Variable der z -Transformation
A	Fläche
B	magnetische Flussdichte
C	Kapazität
D	Dämpfungsgrad, Durchmesser
E	Elastizitätsmodul, Energie, Potential
F	Filterübertragungsfunktion, Kraft
G	Gewicht, Schubmodul, Übertragungsfunktion
H	Enthalpie, magnetische Feldstärke
I	elektrischer Strom, mechanischer Impuls, Torsionsflächenmoment
J	Trägheitsmoment
K	Konstante, Verstärkungsfaktor
L	Induktivität, Lagrangesche Funktion, mechanische Arbeit
M	Drehmoment
N	diskrete Zahl, Windungszahl
P	Druck, Leistung
Q	verallgemeinerte Kraft, Wärmemenge
R	elektrischer Widerstand, Korrelationsfunktion
S	Leistungsdichte
T	Temperatur, Zeitkonstante
U	Einganggröße, elektrische Spannung, Stellgröße
V	Volumen
W	Führungsgröße, mechanische Arbeit
X	Raumkoordinate
Y	Ausgangsgröße, Raumkoordinate, Regelgröße
Z	Raumkoordinate, Störgröße
α	Koeffizient, Wärmeübergangszahl, Winkel
β	Koeffizient, Winkel
γ	spezifisches Gewicht
δ	Abklingkonstante, Deltaimpuls
ϵ	Dehnung
ζ	Widerstandsziffer (Rohrleitung)
η	Wirkungsgrad
ϑ	Temperatur
κ	elektronisches Leitvermögen
λ	Wärmeleitfähigkeit
μ	magnetische Flussdichte, Reibbeiwert
ν	kinematische Zähigkeit
π	Zahl = 3,14159 ...

ρ	Dichte
σ	Standardabweichung, Zugspannung
τ	Zeit
φ	Winkel
ω	Kreisfrequenz
Δ	Änderung
Θ	magnetische Durchflutung, Parameter
Π	Produkt
Σ	Summe
Φ	magnetischer Fluss
Ψ	verketteter magnetischer Fluss

Mathematische Abkürzungen

$\exp(x) = e^x$	
$E\{\}$	Erwartungswert einer regellosen Größe
dim	Dimension
det	Determinante
Re	Realteil
Im	Imaginärteil
\dot{Q}	$dQ(t)/dt$ (erste Ableitung)