

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

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.

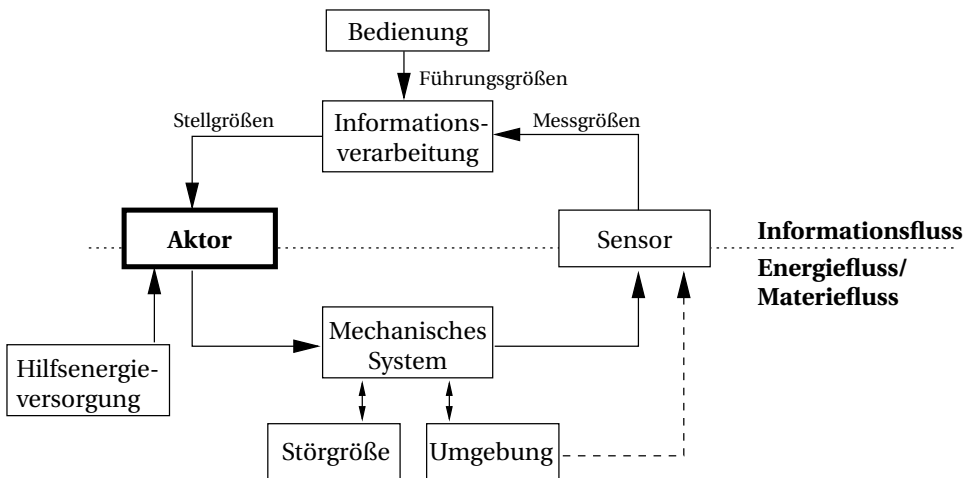


Bild 2.1 Der Aktor an der Grenze zwischen Informations- und Energie-/Materiefluss (nach [lse08])

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

physikalischen Grundlagen als auch verschiedene Bauformen beschrieben sind. Die sich anschließenden Ausführungen zu fluidischen Aktoren fokussieren die in der Mechatronik häufig zur Anwendung kommenden hydraulischen Antriebe. Aus der großen Klasse der neuartigen Antriebstechnologien widmet sich Abschnitt 2.4 den inzwischen weit verbreiteten Piezoaktoren. Das Kapitel schließt mit einem zusammenfassenden Vergleich verschiedener Wirkprinzipien anhand ausgewählter Kenngrößen.

■ 2.1 Aufbau und Wirkungsweise der Aktoren

Die Aktoren befinden sich in der Wirkungskette eines mechatronischen Systems zwischen der Steuer- oder Regelungseinrichtung und dem zu beeinflussenden System oder Prozess, vgl. hierzu Bild 2.2.

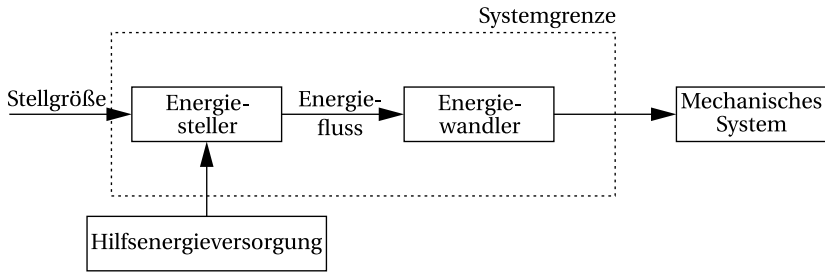


Bild 2.2 Wirkungskette mit Aktor

Die auftretenden Schnittstellen sind sehr unterschiedlicher Art. Die Ansteuerung der Aktoren geschieht in der Regel leistungsarm durch Stellsignale über standardisierte Schnittstellen von einem Mikrorechner, der die Steuer- oder Regelungsbefehle umsetzt, vgl. Kap. 5. Die Ausgangsgröße des Aktors ist eine Energie bzw. Leistung, die sehr häufig als mechanisches Arbeitsvermögen an einer Welle (Rotationsenergie) oder Schubstange (Translationsenergie) zur Verfügung steht. Diese Energie wird durch Hilfsenergie in einem **Energiesteller** bereitgestellt, dem sich der eigentliche **Energiewandler** anschließt, vgl. Bild 2.2. An die mechanische Ausgangsenergie werden bestimmte Anforderungen gerichtet. Beispielsweise kann die bereitgestellte mechanische Energie als Translationsarbeit „Kraft mal Weg“ verwendet werden. Extremfälle sind „große Kraft bei kleinem Weg“ (Kraftstellglied) oder „kleine Kraft bei großem Weg“ (Wegstellglied). Dies erfordert zwischengeschaltete **mechanische Wandler** in der Form von Getrieben, Spindeln, usw., die hier nicht näher betrachtet, sondern dem nachgeschalteten mechanischen System zugeschlagen und dort behandelt werden. Auch der „Energiesteller“ – im Regelfall ist dies ein elektrischer Leistungsverstärker – soll hier nicht gesondert betrachtet werden, sondern er wird als Komponente mit idealen Eigenschaften angenommen. Häufig sorgen unterlagerte Regelkreise für ein nur gering von der idealen Charakteristik abweichendes Verstärkungsverhalten. Damit bleibt als wesentliche Komponente der eigentliche „Energiewandler“, der im Folgenden betrachtet wird.

Bild 2.3a zeigt den Energiewandler als System im Sinne der Thermodynamik. Um die Energie E zu berechnen, die der Wandler als Arbeit W an den Systemgrenzen überträgt, gehen wir aus

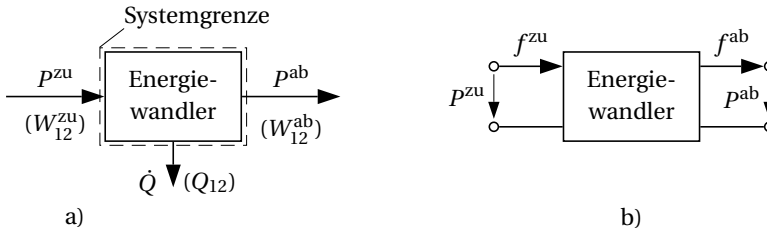


Bild 2.3 Darstellung von Energiewandlern:
a) thermodynamisches System, b) elektrischer Vierpol

von der Leistung P ,

$$P = \frac{dW}{dt}. \quad (2.1)$$

Die Arbeit, die im Zeitintervall $t_1 \leq t \leq t_2$ geleistet wird, ergibt sich zu

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt, \quad (2.2)$$

wobei wir zur Bilanzierung die dem System zugeführten Größen positiv und die abgeführten Größen negativ zählen. Neben der Arbeit W_{12} kann an den Systemgrenzen auch Wärme Q_{12} übertragen und somit die Energie geändert werden. Gemäß dem Energiesatz (1. Hauptsatz der Thermodynamik) gilt für die Änderung der Energie des Systems im Zeitintervall $t_1 \leq t \leq t_2$

$$E_2 - E_1 = W_{12} + Q_{12} \quad (2.3)$$

oder

$$\frac{dE}{dt} = P + \dot{Q}, \quad (2.4)$$

wobei \dot{Q} den **Wärmestrom** über die Systemgrenzen bezeichnet. Geht man von einem stationären Zustand mit $E = \text{konst.}$ aus, so folgt mit den Bezeichnungen von Bild 2.3a für den Energiewandler

$$W_{12}^{\text{zu}} = W_{12}^{\text{ab}} + Q_{12} \quad (2.5)$$

oder

$$P^{\text{zu}} = P^{\text{ab}} + \dot{Q}. \quad (2.6)$$

Darin entspricht der abgeführte Wärmestrom der Verlustleistung des Wandlers. Als Wirkungsgrad η bezeichnet man das Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung. Mit Gl. (2.6) folgt

$$\eta = \frac{P^{\text{ab}}}{P^{\text{zu}}} = \frac{P^{\text{zu}} - \dot{Q}}{P^{\text{zu}}} = 1 - \frac{\dot{Q}}{P^{\text{zu}}}. \quad (2.7)$$

Die wichtigsten **Formen der Leistung** sind die

Tabelle 2.1 Leistungsformen und zugehörige verallgemeinerte Potenzial- und Flussgrößen

Leistungsform	Verallgemeinerte Potenzialgröße p	Verallgemeinerte Flussgröße f	Leistung $P = pf$
mechanisch translatorisch	Kraft F	Geschwindigkeit v	$P_{\text{tr}} = Fv$
mechanisch rotatorisch	Moment M	Winkelgeschwindigkeit ω	$P_{\text{rot}} = M\omega$
elektrisch	Spannung u	Strom i	$P_{\text{el}} = u \cdot i$
fluidisch	Druck p	Volumenstrom \dot{V}	$P_{\text{fl}} = p\dot{V}$
thermisch	Temperaturdifferenz ΔT	Wärmedurchgang kA	$P_{\text{th}} = \Delta T kA$

- mechanische,
- elektrische,
- fluidische und
- thermische Leistung.

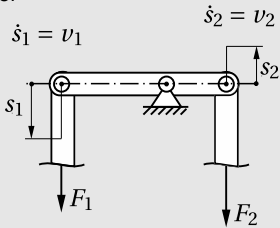
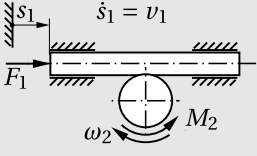
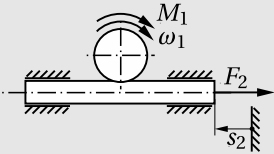
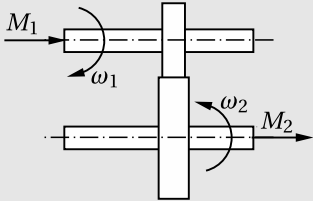
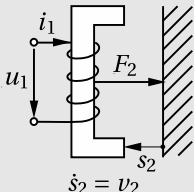
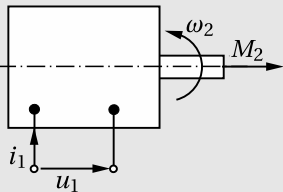
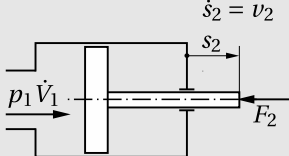
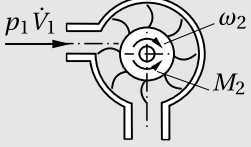
Tabelle 2.1 zeigt die zugehörigen Formel­ausdrücke. Diese Leistungsformen können im Wandler jeweils für sich oder wechselweise gewandelt werden.

Ausgehend von der elektrischen Leistung, die als Klemmenleistung angegeben und üblicherweise durch die Spannung u zwischen zwei Klemmenpunkten und dem Strom i in einem Leiter dargestellt wird, lässt sich ein rein elektrischer Wandler durch die Eingangs- und Ausgangsklemmen kennzeichnen und als Vierpol beschreiben. Für solche Vierpole steht eine ausgebaut­e Theorie zur Verfügung, vgl. [K05]. Dieses Konzept wurde auf allgemeine Wandler übertragen, wobei zwischen den Klemmen eine verallgemeinerte Potenzialgröße p und in den Leitern eine verallgemeinerte Flussgröße f wirkt, vgl. Bild 2.3b. Das Produkt beider Größen ergibt die übertragene Leistung $P = pf$. Diese Vorgehensweise wurde systematisiert und in so genannten **Bond-Graphen** umgesetzt, vgl. [KR68]. Im Folgenden soll dieses Konzept zum Aufzeigen von **Analogien** zwischen den einzelnen Leistungsformen genutzt werden.

Tabelle 2.2 zeigt eine Übersicht gängiger Wandler. Dabei sind die Übertragungsglieder auf der mechanischen Seite entweder Schubstangen oder Wellen, auf der elektrischen Seite elektrische Leitungen und auf der fluidischen Seite entsprechende Rohrleitungen für Fluide. Auf der Eingangsseite der Wandler sind die Potenzial- und Flussgrößen gleichgerichtet, auf der Ausgangsseite hingegen entgegengesetzt gerichtet. Dem entsprechend ist die zugeführte Leistung positiv und die abgeführte Leistung negativ. Neben den aufgezeigten allgemeinen Ähnlichkeiten gibt es noch weitergehende Analogien, die im Verhalten einzelner Bauteile begründet sind. Tabelle 2.3 zeigt eine Gegenüberstellung elementarer **Bauteile** in mechanischen, elektrischen und fluidischen Systemen mit den zugehörigen mathematischen Beziehungen. Damit soll das Verständnis der einzelnen Disziplinen und die Bildung von Querverbindungen erleichtert werden.

Es zeigt sich, dass in den unterschiedlichen Systemen Elemente mit Trägheits-, Speicher- oder Widerstandseigenschaften vorkommen. Letztere führen zu Verlusten, die in Form von Wärmeströmen die Systemgrenzen überqueren. Die mathematische Struktur ist linear und besteht einheitlich in einem proportionalen (P), integralen (I) oder differenziellen (D) Zusammenhang

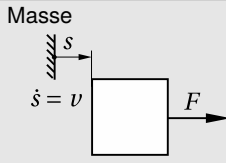
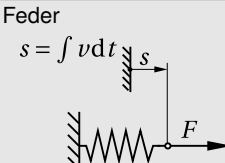
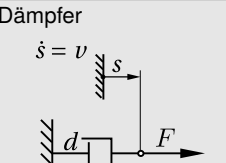
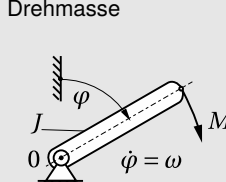
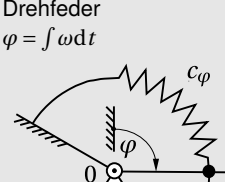
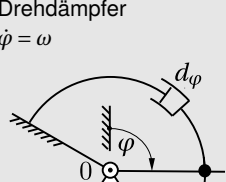
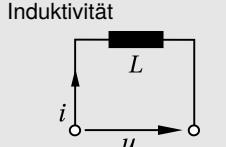
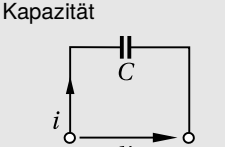
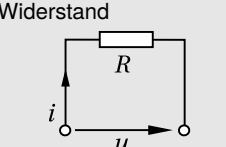
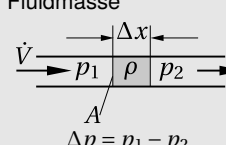
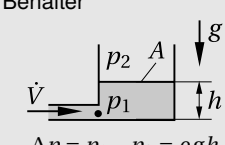
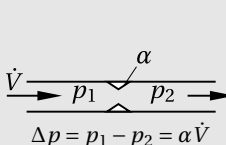
Tabelle 2.2 Übersicht gängiger Wandler

$p^{zu} \equiv P_1$	$p^{ab} \equiv P_2$	
	mechanisch translatorisch	mechanisch rotatorisch
mechanisch translatorisch	Hebel  $\dot{s}_1 = v_1$ $\dot{s}_2 = v_2$	Zahnstange-Zahnrad  $\dot{s}_1 = v_1$
mechanisch rotatorisch	Zahnrad-Zahnstange  $\dot{s}_2 = v_2$	Getriebe 
elektrisch	Elektromagnet  $\dot{s}_2 = v_2$	Elektromotor 
fluidisch	Kolben-Schubstange  $\dot{s}_2 = v_2$	Fluidmotor 

zwischen den verallgemeinerten **Potenzialgrößen** p und den verallgemeinerten **Flussgrößen** f . Die in den Elementen umgesetzte Leistung P folgt wieder als Produkt $P = pf$.

Im Folgenden werden die einzelnen Wandler abhängig von der Form ihrer zugeführten Leistung behandelt, vgl. auch Tabelle 2.2. Dabei stehen die physikalischen Wirkprinzipien und ihre mathematische Beschreibung am Anfang. Es folgen wichtige Konstruktionsmerkmale und Kenndaten sowie Ausführungsformen und Anwendungsbeispiele.

Tabelle 2.3 Analogien zwischen den Bauteileigenschaften in mechatronischen Systemen

System	Elementeigenschaft		
	Trägheit	Speicher	Widerstand
mechanisch transla- torisch	<p>Masse</p>  <p>$F = m\dot{v}$</p>	<p>Feder</p> <p>$s = \int v dt$</p>  <p>$F = cs$</p>	<p>Dämpfer</p> <p>$\dot{s} = v$</p>  <p>$F = dv$</p>
mechanisch rotatorisch	<p>Drehmasse</p>  <p>$M = J\dot{\omega}$</p>	<p>Drehfeder</p> <p>$\varphi = \int \omega dt$</p>  <p>$M = c_\varphi\varphi$</p>	<p>Drehdämpfer</p> <p>$\dot{\varphi} = \omega$</p>  <p>$M = d_\varphi\omega$</p>
elektrisch	<p>Induktivität</p>  <p>$u = L \frac{di}{dt}$</p>	<p>Kapazität</p>  <p>$u = C \int i dt$</p>	<p>Widerstand</p>  <p>$u = Ri$</p>
fluidisch	<p>Fluidmasse</p>  <p>$\Delta p = p_1 - p_2$ $= \frac{\rho \Delta x}{A} \dot{V}$</p>	<p>Behälter</p>  <p>$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho gh$ $h = \frac{1}{A} \int \dot{V} dt$</p>	 <p>$\Delta p = p_1 - p_2 = \alpha \dot{V}$</p>

2.2 Aufbau und Wirkprinzipien elektromagnetischer Aktoren

In der klassischen Antriebstechnik werden überwiegend rotierende elektrische Maschinen eingesetzt. Auch bei mechatronischen Anwendungen, beispielsweise in der Robotik, findet man häufig permanentenerregte Synchronmaschinen wegen ihrer guten Regelungsmöglichkeiten. Die Umsetzung elektrischer in mechanische Leistung erfolgt unter Ausnutzung elektromagnetischer Felder. Bei den **elektrodynamischen Wandlern** (siehe Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2) wirken Kräfte auf stromdurchflossene Leiter (LORENTZ-Kraft) und bei den **elektromagnetischen Wandlern** (siehe Abschnitte 2.2.3 und 2.2.4) treten Kräfte auf Trennflächen von

Gebieten unterschiedlicher Permeabilität auf (Reluktanzkraft). In den nun folgenden Seiten werden zunächst jeweils die zugrunde liegenden Wirkprinzipien und anschließend ausgewählte Bauformen behandelt. Die Ausführungen schließen mit einer tabellarischen Übersicht weiterer, aus Gründen des hier zur Verfügung stehenden Platzes nicht im Detail erläuterten, elektromagnetischer Aktoren und deren Kenndaten in Abschnitt 2.2.5.

2.2.1 Grundlagen elektrodynamischer Wandler

Linearwandler

Alle elektrodynamischen Wandler (Motoren, Linearantriebe, Lautsprecher) basieren einheitlich auf der Wirkung der **LORENTZ-Kraft**. Sie tritt auf, wenn sich ein stromdurchflossenes Leitersystem in einem Magnetfeld befindet, wobei Strom und Magnetfeld Relativbewegungen gegeneinander ausführen können. In der **Elementarmaschine** (Bild 2.4) wird ein zeitlich konstantes homogenes Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte \mathbf{B} [Tesla = $V \cdot s/m^2$] angenommen, in dem senkrecht zur Flussrichtung ein Leiter der Länge l den Strom i führen kann. Unabhängig von der Bewegung des Leiters (Geschwindigkeit \mathbf{v}) entsteht in ihm infolge der bewegten Ladungen Q (Geschwindigkeit \mathbf{v}_Q) die LORENTZ-Kraft

$$\mathbf{F}_L = Q \mathbf{v}_Q \times \mathbf{B}. \tag{2.8}$$

Definitionsgemäß gilt für den Strom i

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dl} \frac{dl}{dt} = \frac{dQ}{dl} v_Q \quad \text{oder} \quad dQ v_Q = i dl. \tag{2.9}$$

Damit folgt aus Gl. (2.8)

$$d\mathbf{F}_L = dQ(\mathbf{v}_Q \times \mathbf{B}) = i(d\mathbf{l} \times \mathbf{B}). \tag{2.10}$$

Für den Betrag der Kraft ergibt sich hier

$$F_L = \|i\mathbf{l} \times \mathbf{B}\|_2 = |i| \|l\|_2 \|B\|_2 |\sin \alpha| \tag{2.11}$$

mit α als eingeschlossenem Winkel zwischen Leiter und Magnetfeld.

Die maximale LORENTZ-Kraft F_L wirkt also für

$$\sin \alpha = \pm 1 \quad \Leftrightarrow \quad \alpha = \pm 90^\circ.$$

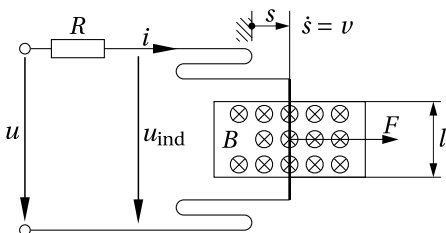


Bild 2.4
Elektrodynamischer Wandler als Elementarmaschine

Der magnetische Fluss Φ [V·s] ist das Integral der Flussdichte über die Fläche, $\Phi = \int \mathbf{B} d\mathbf{A}$. Im vorliegenden Fall gilt $\Phi = BA = Bl s$.

Infolge der Bewegung des Leiters mit der Geschwindigkeit $\dot{s} = v$ ergibt sich eine Flussänderung und somit nach dem Induktionsgesetz eine induzierte Spannung u_{ind} in der Leiterschleife,

$$u_{\text{ind}} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(Bl s)}{dt} = Bl v. \quad (2.12)$$

Die Spannungsbilanz für die Leiterschleife liefert

$$u = Ri + u_{\text{ind}}. \quad (2.13)$$

Daraus folgt die Leistungsbilanz mit der Klemmenleistung $P^{\text{zu}} = ui$, der Verlustleistung $P_V = Ri^2$ und der „inneren“ wirksamen elektrischen Leistung $P_{\text{el}} = u_{\text{ind}} i$, die gleich der mechanischen Leistung $P^{\text{ab}} = Fv$ sein muss,

$$P_{\text{el}} = P^{\text{zu}} - P_V = P^{\text{ab}}, \quad (2.14)$$

$$u_{\text{ind}} i = ui - Ri^2 = Bl v i = Fv. \quad (2.15)$$

Bewegt sich der Leiter stromlos, d. h., ist die induzierte Spannung gleich der äußeren Spannung, so stellt sich die Leerlaufgeschwindigkeit v_0 ein,

$$v_0 = \frac{u}{Bl}. \quad (2.16)$$

Wird dagegen der Leiter abgebremst, wie im Motorbetrieb üblich, so gilt $v < v_0$ und $u_{\text{ind}} < u$. Dann gibt der Leiter mechanische Leistung P^{ab} ab, die er zuzüglich der Verlustleistung P_V auf der Eingangsseite des Wandlers mit P^{zu} aufnimmt. Das Konzept der Elementarmaschine findet direkte Anwendung als dynamischer Lautsprecher oder als Linearantrieb. Anstelle einer Leiterschleife wird jedoch eine Spule mit n Windungen im Magnetfeld bewegt, so dass sich anstelle von Gl. (2.12) die induzierte Spannung zu

$$u_{\text{ind}} = \frac{d\Phi}{dt} = nBl v \quad (2.17)$$

ergibt und die Spannungsbilanz (2.13) um den Spannungsabfall an der Spule infolge der Spuleninduktivität L erweitert werden muss,

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + u_{\text{ind}}. \quad (2.18)$$

Das Ersatzschaltbild eines elektrodynamischen Wandlers zeigt Bild 2.5.

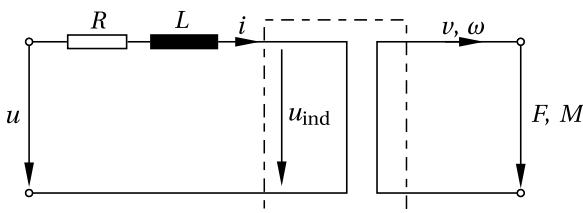


Bild 2.5
Ersatzschaltbild eines
elektrodynamischen Wandlers

Das zugehörige mathematische Modell lässt sich in einfacher Weise finden. Dazu wählt man nach der Vierpoltheorie den Ansatz

$$F = k i \quad (2.19)$$

mit der **Aktorkonstante** k .

Wegen $P_{\text{el}} = P^{\text{ab}}$ oder $u_{\text{ind}} i = F v$ folgt sofort

$$v = \frac{1}{k} u_{\text{ind}}. \quad (2.20)$$

Der Vergleich mit Gl. (2.17) ergibt die Aktorkonstante $k = nBl$. Mit der bewegten Masse m des Aktors gilt (vgl. Tabelle 2.3)

$$F = m \dot{v}. \quad (2.21)$$

Aus Gln. (2.18) und (2.21) folgt nach Elimination von u_{ind} und F mittels Gl. (2.20) bzw. Gl. (2.19) das mathematische Modell

$$\frac{dv}{dt} = \frac{k}{m} i, \quad (2.22)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} i - \frac{k}{L} v + \frac{1}{L} u. \quad (2.23)$$

Mit dem Zustandsvektor $\mathbf{x} = [v, i]^T$ ergibt sich die Zustandsraumdarstellung (vgl. hierzu Abschnitt 7.1.2)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k}{m} \\ -\frac{k}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u, \quad (2.24)$$

oder

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b} u, \quad (2.25)$$

wobei \mathbf{A} die Systemmatrix und \mathbf{b} den Steuervektor des Aktors bezeichnen. Anstelle der Zustandsgrößen v und i kann man auch andere, eindeutig verknüpfte Größen wählen: für die Zustandsgrößen v und F folgt beispielsweise das mathematische Modell

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} F, \quad (2.26)$$

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{R}{L} F - \frac{k^2}{L} v + \frac{k}{L} u, \quad (2.27)$$

das sich wieder in die Zustandsraumdarstellung (2.25) überführen lässt.

Drehwandler

Rotierende elektrodynamische Wandler bestehen grundsätzlich aus einem zylindrischen Stator (Ständer), in dessen „Bohrung“ sich getrennt durch den Luftspalt der Rotor (Läufer) befindet. Um die Ergebnisse der Elementarmaschine zu übertragen, gehen wir von einem Stator als

Index

A

Abfrage
– programmgesteuerte 187, 188
– sammelinterruptgesteuerte 189
– zeitinterruptgesteuerte 188
Absolutkoordinaten 217
Abtastplatte 94, 98
Abtastregelung 369, 382, 393
Abtasttheorem 158, 380, 395
Abtastung (periodische) 142, 156, 159, 163,
171, 360, 369, 377, 381, 393
Ada 207
adaptive Regelung 396
Adjunkte 270, 409
Ähnlichkeitstransformation 347, 351, 390,
411
Aktor 29–69
– Dehnstoff- 64
– elektrochemischer 64
– elektrorheologer 63
– fluidischer 51
– magnetorheologer 63
– magnetostriktiver 63
– piezoelektrischer 62, 63
– Thermobimetall- 63
Aktorkonstante 38
Aliasing 158, 162, 369
Amplitudengang 150, 155, 165, 381, 405
Amplitudenreserve 334, 358
AMR 104, 111
Analog/Digital-Wandler 73
Anregelzeit 324, 381, 382
Anschwingzeit 324
Anti Wind-up 312, 337, 389
Antriebstechnik 34
Asymmetric Multiprocessing, AMP 207
Asynchronmotor 40–42
atomar 201, 202
Ausgangsmatrix 24, 257, 416

Ausgangsvektor 257, 262, 416
Ausregelzeit 324
Ausreißer 301
Autokorrelationsfunktion 143, 145, 147, 149,
308
Autokovarianzfunktion 144

B

Bandbreite 165, 171, 315, 329, 332, 340, 341,
346, 360, 381, 387
bandwidth → Bandbreite
Basissystem 217
Basisvektoren 218
Baumstruktur 216, 227
beobachtbar → Beobachtbarkeit
Beobachtbarkeit 23, 176, 259, 261, 272, 348,
355, 380, 394
Beobachtbarkeitsmatrix 260, 353
Beobachter 348–353
Beobachternormalform 177
Betriebssystem
– kooperatives 196
– Linux 202
– präemptives 196
– RTOS → Echtzeit-Betriebssystem
Bewegungsgleichung 238, 242, 244, 247, 249,
280, 383, 397
Bias 175, 176, 288, 294, 296–298, 303, 312,
315, 316
Bias-Varianz-Dilemma 303
Bildbereich → Frequenzbereich
Bilineartransformation 168, 374
bimorphe Bauweise 68
BODE's Integral Theorem →
Gleichgewichts-Theorem
Bolt 206–207
Bond-Graphen 32
Brückenschaltung

– WHEATSTONE'sche 84
Burst 133

C

CAN-Bus 210
– CSMA/CA 210
charakteristische Gleichung 270, 271, 345,
349, 351, 384, 410
Computer Torque Control 398
Contextswitch 191, 192, 201
CORIOLIS-Kraft 117
COULOMB'sche Reibung 18, 243, 289, 317,
353
crest factor 307

D

D-Glied 337, 395
Dämon 198
Dämpfungssatz 404–406
Datenvorverarbeitung 301
Dead-Beat Entwurf 371, 385, 396
Deadline 187, 195, 197
Deadlock 204
Dehnstoff-Aktor 64
 δ -Funktion → DIRAC'sche Deltafunktion
 δ -Modulator 371, 408
 δ -Operator 168, 390–393
Designmatrix 289, 298, 318
Diagonalform 261, 266, 271, 282, 347, 411
diamagnetischer Stoff 43
Dielektrizitätszahl 112
Dienstgüte eines Betriebssystems 213
Differentialoperator 254, 315
Differenzenquotient 116, 170, 236, 274, 373,
382, 394
Differenzierer 265
digitale Regelung 369–396
DIRAC'sche Deltafunktion 140, 147, 255, 257,
265, 268, 372
direkte Dynamik 238
direkte Kinematik 230, 232
direkter piezoelektrischer Effekt 82
Diskrete FOURIER-Transformation 160–164
Diskretisierung 157, 237, 275, 370–380, 394

Dominanzmaß 283
DOPPLER-Effekt 118
Drallsatz → Drehimpulsatz
Drehfeldmotor 40
Drehgeber 100, 108, 111
Drehimpulsatz 239, 241, 242, 244, 252
Drehmagnet 47
Drehmatrix 219, 220, 221
Drehwandler 37, 46
Drehzahlregelung 40, 42
Drosselsystem 105
Druckmessung 90
Drucksensor 90
Durchgangsmatrix 24, 257, 416
Durchlass-
– -bereich, -dämpfung, -frequenz 165
Durchlasswelligkeit 165
Düse-Prallplatte-System 56, 57
Dynamik
– direkte 238
– inverse 238, 247, 397

E

Earliest Deadline First 197
Echtzeit (harte, starke, weiche) 187
Echtzeit-Betriebssystem 196, 207, 208, 211,
394
– μ C/OS, CoCoX CoOS, NuttX 212
– freeRTOS 202, 212
– QNX 202, 212
– VxWorks 202, 212
Echtzeitdatenverarbeitung 186, 210, 211
Eckfrequenz 165
Effekt
– piezoelektrischer 134
Eigenvektor 265, 282, 356, 410–412
Eigenwert 265–272, 282, 345, 348, 356, 390,
410–412, 418
Einfeldabtastung 98, 99
Eingangsvektor 257, 262, 362, 377, 413, 416
Einheitsvektoren 217
Einplanung
– zyklische, periodische 195
Einschwingzeit 324, 346
elektrochemischer Aktor 64

- elektromagnetischer Wandler 46
 elektrorheologer Aktor 63
 Element
 – piezoelektrisches 133
 Elementardrehungen 220
 Elementarmagnete 43
 Elementarmaschine 35, 36
 Empfindlichkeitsfunktion 328, 326–337, 358,
 361, 362, 366, 368
 – komplementäre 328, 362
 Empfindlichkeitsmatrix →
 Empfindlichkeitsfunktion
 endliche Wortlänge 142, 389, 392, 395
 Energie
 – kinetische 242, 247, 259
 – potentielle 248, 259
 Energiefluss 17
 Energiesteller 30
 Energiewandler 30
 Equation Error Model → Modell,
 – Gleichungsfehler
 Ereignis
 – asynchrones 186
 – synchrones 186
 Ereignisscheduling 195
 Ereignissteuerung 210
 Erwartungstreue 288
 Erwartungswert 141, 143, 174, 180, 184, 288,
 290, 298
 – empirischer 143, 302
 EtherCAT 74, 210
 Ethernet
 – CSMA/CD, -POWERLINK 210
 EULER-Integration 373
 EULER-Winkel 222
- F**
- Faltungintegral 255, 265
 Faltungssatz 404–406
 Fast FOURIER-Transformation 163
 Feedback-Linearisierung 397
 Feldbus 208
 Feldkonstante
 – elektrische 64, 112
 Feldregelung 40
 FERRARIS-Sensor 123
 ferromagnetischer Stoff 43
 Festwertregelung 312, 329, 337, 339, 342
 Filter
 – Allpass 164
 – Anti-Aliasing 164
 – Bandpass 135, 164
 – Bandsperre 164
 – BAYES-Filter 184
 – BESSEL-Filter 166
 – Breitbandfilter 151
 – BUTTERWORTH-Filter 166
 – CAUER-Filter 166
 – elliptisches 166
 – Extended KALMAN-Filter 180–182
 – FIR 167, 170, 310
 – Formfilter 149
 – GAUSS-Filter 184
 – Hochpass 164
 – IIR 166
 – KALMAN-Filter 173–184, 350, 354, 360
 – KALMAN-BUCY-Filter 350
 – nichtparametrisch 184
 – parametrisch 184
 – SAVITZKY-GOLAY-Filter 170
 – Schmalbandfilter 151
 – Tiefpass 164
 – TSCHEBYSCHJEFF-Filter 166
 – Unscented KALMAN Filter 182–184
 – Zustandsvariablenfilter 170–172, 315, 316
 Filterung 173
 fluidischer Aktor 51
 Fluidkreislauf 51
 Fluidmotor 55
 Fluss
 – Informations-, Materie-, Energie- 17
 – magnetischer 36
 Flussdichte 35
 Flussgröße 32
 Folgeregung 329, 337, 339, 342
 Formfiltersynthese 149
 FOURIER-Reihe 148, 153, 154, 157
 FOURIER-Transformation 145, 154, 404
 – diskrete 160–164
 – inverse diskrete 162
 FPGA 208
 Freiheitsgrad

– aktiv 216
 fremderregter Gleichstrommotor 39
 Frequenzbereich 66, 145, 149, 154, 158, 162,
 254, 319, 344, 359, 371
 Führungsübertragungsfunktion 336
 Führungsverhalten 330, 345, 379, 394
 Fundamentalmatrix 258, 271, **416**

G

γ -Operator 391
 Gegenkopplungsbereich 330
 geschlossene kinematische Kette 216, 229
 Gewichtsfunktion 255, 270, 362, 371, 413
 Glättung 173
 Gleichgewichts-Theorem **330**, 359
 Gleichgewichtslage 263
 Gleichstrommotor 38, 39
 Gleichverteilung 142, 156
 globale Linearisierung 397
 GMR 104
 GRAY-Code 94, 101
 Grenzzyklus 337
 Gruppenlaufzeit 166

H

H_0 -Modulator → Halteglied 0.-ter Ordnung
 \mathcal{H}_2 -Regelung 361, **365**
 \mathcal{H}_∞ -Regelung 361, **367**, 389
 HALL
 – Konstante 111
 – Spannung 111, 124
 HALL-Element 124
 HALL-Sensor 110
 Halteglied 0.-ter Ordnung 316, 370, **371**, **377**,
 381, 408
 Hauptachsentransformation 411
 Hauptkoordinaten 418
 Hidden Oscillation 395
 Hilfsenergie 30
 holonom 239
 homogene Koordinaten 223
 homogene Lösung 254, 258, 262
 homogene Transformation 223
 Homogenitätsprinzip 253

hybride Bauweise 68
 Hydraulikkreislauf 51
 hydraulischer Wandler 55
 Hydromotor 59
 Hysteresefehler 79

I

I-Glied 337, 373
 Identifikation 286–320
 – direkte 311
 – indirekte 311
 Identifizierbarkeit 307–311
 Idle-Task → Leerlaufprozess
 Impulsantwort 145, 149, 255, 362
 Impulsatz 241, 252
 Inductosyn[®] 108
 Induktionsgesetz 36, 83, 107, 116
 Induktionsspannung 116
 Inertialsystem 217
 Informationsfluss 17
 Instrumentationsverstärker 84
 Integralkriterium 324, 326, 354
 Interferometer 103
 Internal Model Control 339
 Interpolationsgrad 171
 Interrupt 188–191, 195, 201, 204, 213
 Interrupt-Auflösungsgrenzfrequenz 213
 Interrupt-Folgegrenzfrequenz 213
 Interruptserviceroutine 191, 192
 Interruptsperrung 190
 inverse Dynamik 238, 247
 inverse Kinematik 231

J

JACOBI-Matrix 234
 – analytisch 234, 235
 – geometrisch 234
 Java 206
 Jitter 210, 213, 394

K

Käfigläufer 41

KALMAN-Filter → Filter, -KALMAN-Filter
 KALMAN-Ungleichung 358
 KALMAN-Zerlegung 260
 Kanal
 – zur Synchronisation 207
 Kapazität 112
 KARDAN-Winkel 221
 Kaskadenregelung 342
 Kernel-Thread 198
 Kinematik 217
 – direkte 230, 232
 – inverse 230, 231
 kinematische Kette
 – geschlossene 216, 229
 – offene 216, 227
 kinematische Verträglichkeit 229
 Kinetik 237
 KKF → Kreuzkorrelationsfunktion
 Kleinsignalverhalten 24, 273, 277, 279, 301, 384
 Klemmenmodell 254, 258, 260, 268, 371, 373
 Kommutator 38
 komplementäre Empfindlichkeitsfunktion
 → Empfindlichkeitsfunktion
 Konditionszahl 318
 Konfiguration
 – eines MKS 231
 konsistent 288
 Kontext 191, 193
 Koordinaten
 – homogene 223
 – Umweltkoordinaten 230
 – verallgemeinert 230
 Korrektur 174, 350
 Korrelation 143, 159
 Korrespondenztabelle 407
 Kraftstellglied 57
 Kreuzkorrelationsfunktion 143, 159
 Kreuzkovarianzfunktion 144
 kritischer Pfad 205
 Kurtosiswert 143

L

LAGRANGE'sche Gleichungen 2. Art 247
 LAGRANGE'sche Methode 239, 247

LAPLACE-Transformation 254, 403
 Laser 103, 113, 118
 Laser-Triangulation 113
 Laservibrometer 118
 Latenzzeit 213
 Lautsprecher 36
 Leakage, auch Leck-Effekt 163
 Least-Squares Schätzer → Schätzer
 –Least-Squares
 Leerlaufgeschwindigkeit 36
 Leerlaufprozess 193
 Leistung 31
 Leistungsformen 32
 Leistungsverstärker 30
 linear → Linearität
 Linearantrieb 36
 Linearisierung 24, 277–281
 Linearität 253, 263
 Linearitätsfehler 79
 Linearitätssatz 403, 405, 406
 Linearwandler 35, 43, 55
 Linienspektrum 148, 149, 161, 307
 Linkseigenvektoren 410
 Linksmatrix 411
 Linux 199
 LJAPUNOV-Stabilität 263–264
 loop shaping 361, 367, 389
 LORENTZ-Kraft 34, 35, 39, 111
 LTI-System 24, 253–272, 344
 LTV-System 278

M

Maßstab 93, 94
 Maßverkörperung 93
 magnetische Erregung 43
 magnetische Flussdichte 35
 magnetischer Fluss 36
 magnetoelastisches Prinzip 83, 88
 magnetorheologer Aktor 63
 magnetostriktiver Aktor 63
 Majorante 362, 368
 Materiefluss 17
 Matrix
 – JACOBI- 234, 235
 mechanischer Wandler 30

Mechatronik
 – Grundbegriffe 13
 Mehrkörperdynamik 216
 Mehrkörpersystem 215, 396
 Messrauschen 173–175, 294, 298, 299, 301, 303, 304, 316, 326, 329, 330, 350, 359, 363, 380
 Messverfahren
 – inkrementell und absolut 93
 Methode
 – synthetische 245
 Mindestdämpfung 346, 376
 Mindeststabilitätsgrad 346
 Minimalphasigkeit 151, 300, 340, 394
 Mitkopplungsbereich 330
 Modalanalyse 155
 modale Reduktion 282
 Modalform → Diagonalform
 Modalkoordinaten 418
 Modalmatrix 411, 415
 Modalraum 418
 Modaltransformation 418
 Modell
 – ARMAX 295, 299, 316
 – ARX 295, 295, 296, 298–300, 312, 316
 – Ausgangsfehler- 294
 – Black Box 292
 – Box-Jenkins 295
 – CARX 314–316
 – dynamisches 238
 – Gleichungsfehler- 294, 295, 296
 – Gray Box 292
 – OE 295
 – White Box 291
 Modellbildung
 – experimentelle 21
 – theoretische 21
 Modellordnung 292, 301–306
 Modulationssatz 404
 Monitor 206
 Motor
 – Drehfeld- 40
 – Gleichstrom- 38
 – Nebenschluss- 39
 – Reihenschluss- 39
 – Reluktanz- 46, 47
 – Schritt- 46, 47

Multicore 207
 Multitasking 191–207
 Mutex 206

N

Nachstellzeit 337
 NEWTON-EULER-Methode 239, 243, 245
 nichtholonom 239
 Norm 333, 412
 – \mathcal{H}_2 - 362, 414
 – \mathcal{H}_∞ - 362, 414
 – EUKLIDISCHE 412
 – FROBENIUS-NORM 413
 – Matrixnorm 413
 – Maximumnorm 412
 – Spektralnorm 413
 – Summennorm 412
 – Vektornorm 412
 Normalverteilung 141, 173, 298, 305, 309
 Nullpunktfehler 78
 Nullstelle 151, 300, 331, 340, 341, 375, 393, 395
 – Diskretisierungs- 168, 371, 394
 – intrinsische 394

O

offene kinematische Kette 216, 227
 omnidirektionales System 233
 Operationsverstärker 84
 OSI-Referenzmodell 209
 Outlier 301
 Output Error Model → Modell,
 – Gleichungsfehler
 Overfitting 304

P

P-Glied 337, 342
 paramagnetischer Stoff 43
 Parametersensitivität 392
 partikuläre Lösung 254, 258, 262
 PEARL 202
 Pendel
 – inverses 245, 279, 382–385

periodische Abtastung → Abtastung
 (periodische)

Periodizität 143

Permeabilität 35, 43

- absolute 43
- relative 43, 105

Permeabilitätszahl 43

Permittivität

- relative 64, 112

Persistent Excitation 307–311

Phasengang 150, 155, 405

Phasengitter 101

Phasenreinheit 213

Phasenreserve 334, 358, 361, 387

Piezoeffekt

- direkt 62
- indirekt 62

piezoelektrischer Aktor 62, 63

piezoelektrischer Effekt 88, 134

piezoelektrisches Element 88, 133

Piezokeramik 134

Planbarkeitsanalyse 195

Plattenkondensator 112

PLCD 110

Pneumatiksystem 51

Polling 187, 188

Polpaarzahl 40

Polzuweisung 342, 346–348, 357, 382, 398

positiv (semi-)definit 354, 409

POSIX 202

Potentiometer 92

Potenzialgröße 32

Prädiktion 173, 174, 183, 292, 350

Prädiktor

- optimaler 294, 296, 299

Prädiktorgleichung 294

Präemption 199

Präemptionstest 213

PRBS, Pseudo Random Binary Signal
 308–311, 316, 318

Pre-Warping 375

Preemptive Contextswitch 198

Pressduktor 88

Prinzip der virtuellen Arbeit 248

Prioritätsinversion 203

Prioritätsvererbung 204

Prioritätsinterruptsystem 190

probabilistische Inferenz 184

Producer-Consumer-Schema 205

programmgesteuerte Abfrage 187, 188

proper 330, 338, 340

Proportionalmagnet 56

Prozess 18

- ergodisch 142
- GAUSS-Prozess 141

Prozessdatenverarbeitung 185

Prozessorauslastung 196

Prozessrauschen 173, 175, 178, 329

Prozessrechner 185, 369, 394

Prozessumschalter 192, 193

Prozessumschaltung → Contextswitch

Prozess/Zeit-Diagramm 194, 197, 199, 203

Prozesszustandsgraph

- Nutzerprozess 193
- Supervisorprozess 192

PSD 113

Pseudoinverse 289, 414

- linke 414
- rechte 414

Q

Quantisierungsrauschen 93, 142, 156, 166,
 389

R

Random Walk 139, 152, 176

- Angular Random Walk 176
- Rate Random Walk 176

Rang 409

Rate Monotonic Scheduling 196

Rauschen

- farbiges 147, 149
- instationäres 152
- Messrauschen → Messrauschen
- Prozessrauschen → Prozessrauschen
- Quantisierungs- →
 Quantisierungsrauschen
- Systemrauschen 173
- weißes 142, 146, 149, 151, 152, 291, 294

Reaktionszeit 187, 199, 212

Rechteckregel

- Rückwärts- 374
- Vorwärts- 373
- Rechtseigenvektoren 410
- Rechtsmodalmatrix 411
- Rechtzeitigkeit 211
- reentrant 187
- Referenzkoordinatensystem 217
- Regeldifferenz 324
- Regelfehler 329
- Regelqualität
 - nominelle 323, 363
 - robuste 323
- Regelstrecke 149, 150, 291, 294, 296, 298, 311, 312, 316, **321**, 325–328, 330, 331, 333, 337–342, 347, 348, 360, 364, 366, 368–372, 375, 376, 381, 395–397, 408
- Regelung 321
 - \mathcal{H}_2 - → \mathcal{H}_2 -Regelung
 - \mathcal{H}_∞ - → \mathcal{H}_∞ -Regelung
 - adaptive 396
 - D- → Regelung - PID-
 - digitale 369–396
 - Festwertregelung → Festwertregelung
 - Folgeregelung → Folgeregelung
 - I- → Regelung - PID-
 - IMC 339
 - Kaskadenregelung → Kaskadenregelung
 - LQ- 354, 355
 - LQG 360
 - LTR 361
 - optimale 354–361
 - P- → Regelung - PID-
 - PD- → Regelung - PID-
 - PI- → Regelung - PID-
 - PID- 312, 325, 336–342, 386–389, 395
 - RICCATI- 354–360
 - robuste 334, 335, 361–368
 - Zustandsregelung 344–353, 355
- Regelungsnormalform 170, 261, 346
- Regressoren 287, 289, 291, 298, 305, 318
- Relativdrall 241
- relativer Grad 313, 393
- Relativkoordinaten 217
- Reluktanz 46
- Reluktanzkraft 35, 43, 44
- Reluktanzmotor 46, 47
- Rendezvouskonzept 207

- Residuum 292, 293, 301
- Resolver 108
- rheonom 239
- RICCATI
 - Gleichung 355, 360
- Ripple → Durchlasswelligkeit
- Robustheit 333
- Rotationsmatrix 219
 - inverse 219
- RTOS → Echtzeit-Betriebssystem
- Rückführdifferenzmatrix 328
- Rückführmatrix 345
- Rückkopplung 321
- Rückwärtsdifferenz 275

S

- sammelinterruptgesteuerte Abfrage 189
- Schätzer
 - BAYES 290
 - GAUSS 288, 289
 - GAUSS-MARKOV 291
 - Instrumentalvariablen- 298, 299, 315, 316
 - konsistent 288
 - Least-Squares 288–290, 297, 315
 - linearer 289
 - Maximum a-posteriori 290
 - Maximum Likelihood 290
 - unverzerrter 159, 288
- Schätzproblem 287
- Schätzung
 - a posteriori 174, 182
 - a priori 174, 182
 - verzerrungsfreie 143
- Scheduling 195
 - dynamisches 196
 - Ereignisscheduling 195
 - statisches 195
 - Zeitscheduling 195
- Scheitelfaktor 307
- Schiefe 143
- Schleifringläufer 41
- Schließbedingung 229
- Schrittmotor 46, 47
- Schubstange 55
- Semaphor 202–205

- Semaphor, zählend 205–206
- Sensitivitätsfunktion →
Empfindlichkeitsfunktion
- Sensor
- Auflösung 75
 - integrierter 73
 - intelligenter 74
 - Messbereich 75
 - Messgenauigkeit 76
 - Präzision 76
 - Richtigkeit 76
- Sensoren 71–136
- Durchlichtsystem 94
 - Dehnungsmessstreifen 80
 - externe 130
 - exterozeptive 130
 - interne 130
 - Kompensationswaage 89
 - magnetoelastische Dehnungssensoren 83
 - piezoelektrische Dehnungssensoren 82
 - piezoresistive DMS 81
 - Potentiometer 91
 - Pressduktoren 88
 - propriozeptive 130
 - Strömungsmessung 129
 - Thermistor 125
 - Thermoelemente 128
- Separationsprinzip 348, 349, 360
- Servoventil 55, 56, 59
- SHANNON-Theorem → Abtasttheorem
- Sigmapunkt 182
- Signal 137
- analog 137
 - deterministisch 138
 - digital 137
 - ergodisch 139
 - periodisch 138
 - stationär 139
 - stochastisch 139
 - transient 138
 - wertdiskret 138
 - wertkontinuierlich 137
 - zeitdiskret 138
 - zeitkontinuierlich 137
- Signal-Rausch-Verhältnis 84, 290, 303, 307, 319
- Signalkennfunktion 143, 146
- Signalkennwert 143, 146
- singuläre Perturbation 284
- Singulärwert 362, 413, 415
- SISO-Modellfamilie 293
- SISO-System → System- SISO
- skleronom 239
- Small Gain Theorem 332, 335
- Spannungsregelung 40
- spektrale Kreuzleistungsdichte 145
- spektrale Leistungsdichte 145, 148, 149
- spektrale Zerlegung 151
- Spektralnorm 415
- Spektralradius 410
- Sperrbereich 165
- Sperrdämpfung 165
- Sperrfrequenz 165
- sphärisches Gelenk 234
- Sprungantwort 151, 178, 255, 300, 310, 323, 338, 382
- Spur 362, 409, 413, 417
- Störgrößenbeobachter 352
- Störverhalten 379
- Stabilität 262–272
- asymptotische 264, 346
 - äußere 262
 - BIBO → Stabilität -
Eingangs-/Ausgangsstabilität
 - Eingangs-/Ausgangsstabilität 262, 264, 270, 332
 - exponentielle 264
 - innere 262, 263
 - interne 326–328, 330, 340
 - LJAPUNOV- 262, 263
 - nominelle 322
 - robuste 323, 363
 - Zustandsstabilität 262, 263
- Stabilitätsgebiet 266, 267, 374, 391
- Stabilitätsgrenze 268, 339, 376
- Stabilitätsreserve 346, 376
- Standardabweichung 141
- Stapelbauweise 67
- starvation 195, 204
- Steigungsfehler 79
- steuerbar → Steuerbarkeit
- Steuerbarkeit 23, 259, 261, 272, 346, 394
- Steuerbarkeitsmatrix 259
- Steuermatrix 24, 257, 416

Steuerung 321
 Steuervektor 37, 170, 279, 281
 Strahlrohr 56
 Strecke → Regelstrecke
 Streifenbauweise 68
 Strichplatte 94, 98
 Submultiplikativität 333, 335, 413
 Superposition 152
 Superpositionsprinzip 253
 Supervisorcall 192
 Supervisorprozess 192
 Supremum 414
 Symmetric Multiprocessing, SMP 207
 Synchrondrehzahl 41
 Synchronisation von Prozessen 200–204
 Synchronmotor 40, 41
 System 16
 – autonomes 263
 – mechatronisches 13–27
 – MIMO-, Multiple-Input Multiple-Output 255, 257, 261, 262, 274, 345
 – normal 231
 – redundant 231
 – SISO-, Single-Input Single-Output 255, 259, 260, 270, 293, 328, 358
 – überbestimmt 231
 – unterbestimmt 231
 Systemdynamik 18
 Systemmatrix 24, 37, 170, 257, 281, 416
 Systemrauschen 173, 329, 363

T

Tachogenerator 116
 Taskattribute
 – Ausführungszeit 196
 – Deadline 195
 – Periodendauer 195, 196
 – WCET 195
 Taskscheduling 195
 TAYLOR-Reihe 274, 277
 TDMA 211
 teilerfremd 272
 Teilkreis 100
 Teilung 93
 Thermistor

– NTC 127
 – PTC 126
 Thermobimetall-Aktor 63
 Tildeoperator 226, 241
 Totzeit 294, 324, 334, 339, 371, 377, 379, 381, 393, 394
 Transformation
 – homogene 223
 Transformationsmatrix
 – homogene 223
 Transitionsmatrix → Fundamentalmatrix
 Trapezregel 374, 386, 388
 Triangulation 113
 TUSTIN-Methode → Bilineartransformation

U

Überanpassung 304
 Übergangsmatrix → Fundamentalmatrix, 416
 Übergangszeit 324
 Überkreuzvalidierung 306
 Überlagerung 152
 Überschwingweite 324, 346
 Übertragungsfunktion 23, 150, 154, 166, 171, 177, 178, 255, 255, 260, 268, 270, 272, 299, 309, 312, 327, 338, 341, 344, 362, 366, 371, 375, 386, 387, 389, 391, 406, 408
 Übertragungsfunktionsmatrix 255, 258, 260, 270, 327, 329, 333, 357, 361–363, 365, 413, 416
 Ultraschallsensor 135
 Umweltkoordinaten 230
 Underfitting 304
 Unempfindlichkeitsbereich 330
 Unscented Transformation 182
 Unsicherheit
 – dynamische 333
 – parametrische 333
 Unteranpassung 304

V

Varianz 141, 184
 – empirisch 143, 288
 Verbrauchsoptimalität 354, 359

Verlaufsoptimalität 354, 359
 Verschiebeoperator 168, 256, 291, 391
 Verschiebungssatz 403, 405, 406
 Verteilungsdichtefunktion 139–141, 155
 Verteilungsfunktion 139
 Vier-Feld-Abtastung 96, 98, 99
 Vierpole 32
 V-Modell 26
 Vorfilter 327
 Vorhaltzeit 337
 Vorsteuerung 340, 343
 Vorwärtsdifferenz 274

W

WALSH-Korrelation 213
 Wandler 32

- Dreh- 46
- elektrodynamischer 39
- elektromagnetischer 46
- hydraulischer 55
- idealer piezoelektrischer 66
- Linear- 35, 43, 55
- mechanischer 30
- piezoelektrischer 62

 Wankpol 252
 Wegeventil 55
 WEISS'sche Bezirke 43
 Widerstand

- magnetischer 44

 Widerstandsregelung 40
 Wind-up Effekt 337

X

XMOS 208

Z

Zeitbereich 146
 zeitinterruptgesteuerte Abfrage 188
 Zeitscheduling 195
 Zeitsteuerung 211
 zentrale Differenz 275
 Zentralmomente 141
 Zero-Pole Matching 375
 \mathcal{Z} -Rücktransformation 406
 \mathcal{Z} -Transformation 256, 406
 \mathcal{Z} -Übertragungsfunktion →
 Übertragungsfunktion
 Zusammensetzbarkeit 211
 Zustandsgrößen → Zustandsvektor
 Zustandsraum 257
 Zustandsraumdarstellung 37, 170, 176,
 257–262, 270, 272, 280, 344, 352, 354, 365,
 377–380, 384, 391
 Zustandsregelung 344–353
 Zustandsrückführung 345–346
 Zustandsschätzer → Beobachter
 Zustandsvektor 18, 37, 46, 174, 179, 181, 257,
 259, 262, 270, 282, 348, 350, 354, 355, 378,
 416
 Zwangsbedingung

- holonom 239
- rheonom, skleronom 239
- nichtholonom 239