

# Vorwort

In vielen Bereichen des Ingenieurwesens vollzieht sich seit nahezu 20 Jahren ein großer technologischer Wandel. In rasch zunehmendem Maße gewinnen Elektronik und Informationstechnik an Einfluss auf die technischen Produkte und damit auf die klassischen Methoden und Arbeitsweisen in den einzelnen klassischen Fachdisziplinen. Betrachtet man z.B. die Entwicklung des Maschinenbaus, der Feinwerktechnik oder des Fahrzeugbaus, so erkennt man eine immer höhere Konzentration und Integration der Elektronik und Informatik in den einzelnen Maschinen, Geräten und Fahrzeugen.

Überwiegend mechanisch ausgerichtete Unternehmen schätzen, dass sich der Anteil der Mechanik an den Herstellkosten ihrer Produkte in den nächsten 5 bis 10 Jahren von ca. 90 auf ca. 50% verringern wird. Immer wichtiger werden dagegen Elektronik und Software. Ihr Anteil beträgt schon heute ca. 10% der Herstellungskosten. In Zukunft wird dieser Anteil auf über 40% steigen. Bewertet man einzelne technische Baugruppen auf ihre Funktionalität, so wird die weiter steigende Wertschöpfung gegenüber der Wertigkeit der Mechanik noch deutlicher.

Um die technischen Herausforderungen der Zukunft meistern zu können, müssen deshalb die traditionellen Grenzen der Ingenieurtechnik überschritten werden.

Als neuartige interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft und Technologie vereint die Mechatronik nun Elemente der traditionellen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik. Sie wird überall dort gebraucht, wo durch intelligente Verknüpfungen der einzelnen Teildisziplinen eine Steigerung der Gesamtfunktionalität erreicht werden soll. In den neuen mechatronischen Produkten bilden also die mechanischen Systeme, Sensoren, Aktoren und Mikrorechner sowie die zugehörige Software ein technisch aktives oder kürzer ein mechatronisches System. Der Integrationsgrad mechatronischer Systeme geht so weit, dass einzelne Teilsysteme ohne die jeweils anderen Teilsysteme nicht arbeitsfähig sind und die Gesamtfunktion nur durch das ideale Zusammenwirken aller Teilfunktionen realisiert werden kann. So kann z.B. bei Werkzeugmaschinen eine hohe Bearbeitungsgenauigkeit erst dann wirtschaftlich erreicht werden, wenn alle Unzulänglichkeiten in der mechanischen Struktur durch eine geeignete Sensorik erkannt und durch eine intelligente Informationsverarbeitung korrigiert wird. Mit dieser Maßnahme kann der Aufwand bei der Entwicklung und der Fertigung der Maschine deutlich reduziert werden. Mechatronik ist also die Basis für neue, intelligent gesteuerte und geregelte technische Produkte mit gesteigerter Funktionalität, höherer Zuverlässigkeit und höherer Wirtschaftlichkeit. Um die Zusammenhänge ver-

stehen zu können, haben wir nun die mathematischen, physikalischen und technischen Grundlagen der einzelnen Fachgebiete in zwei Bänden zusammengestellt.

In Band 1 werden die allgemeinen mathematischen, physikalischen und technischen Grundbegriffe der Mechatronik, der Analog- und Leistungselektronik sowie der Sensoren und Aktoren behandelt.

Band 2 vermittelt die digitale Steuerungstechnik, die Regelungstechnik mit Optimierung, mechanische Mehrkörpersysteme sowie ein zeitgemäßes mechatronisches Anwendungsbeispiel und für die Regelungstechnik und die Mechanik von Mehrkörpersystemen wichtige mathematische Gesetzmäßigkeiten.

Die einzelnen Kapitel der beiden Bände können im fachlichen Zusammenhang oder auch als einzelne Kapitel – sozusagen fachspezifisch – gelesen werden. Die Stoffzusammenstellung entspricht den Vorlesungsinhalten, wie sie an der Fachhochschule Aalen im Studiengang Mechatronik gehalten werden. Das Buch dient auch Studenten/innen an Fachhochschulen und Universitäten sowie Technikern verschiedener Fachrichtungen, die sich mit Mechatronik weiterbilden oder in ihrer beruflichen Praxis damit befassen müssen.

Es werden Grundkenntnisse in Mathematik, Physik, Technische Mechanik und Elektrotechnik vorausgesetzt, wie sie im technischen oder physikalischen Grundstudium an einer Hochschule vermittelt werden.

Der Begriff «Mechatronics» wurde ursprünglich im Jahre 1969 von der japanischen Firma Yaskawa Electric Corporation erdacht und ab 1971 als Handelsname geschützt.

Die Autoren danken allen, die mit Informationen und kritischen Hinweisen mitgeholfen haben das Thema zu optimieren sowie dem Verlag für die Verwirklichung. Resonanz aus Leserkreisen ist uns immer willkommen!

E-Mail an: [edmund.schiessle@fh-aalen.de](mailto:edmund.schiessle@fh-aalen.de)

Aalen

Edmund Schiessle  
die Autoren

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
<b>1 Grundlagen</b>	<b>13</b>
1.1 Der Begriff Mechatronik und mechatronisches System	13
1.2 Grundbegriffe	14
1.2.1 Signale und Systeme	14
1.2.2 Statische und dynamische Eigenschaften mechatronischer Systeme	15
1.2.3 Stationäre und flüchtige Eigenschaften mechatronischer Systeme	15
1.2.4 Modell und Simulation	15
1.2.5 Linearisierung von Kennlinien	16
1.2.6 Linearisierung von Differentialgleichungen	16
1.2.7 Testfunktionen	17
1.3 Aufstellung und Lösung von linearen Differentialgleichungen im Zeitbereich	18
1.3.1 Aufstellen und Lösen einer linearen Differentialgleichung im Zeitbereich mit Testfunktionen	18
1.3.2 Übertragungsfunktion im Zeitbereich	23
1.3.3 Analogiebildung zwischen mechanischen und elektrischen Systemen	24
1.4 Aufstellung und Lösung linearer Differentialgleichungen im Frequenzbereich	27
1.4.1 Euler-Transformation	27
1.4.2 Aufstellen und Lösen linearer Differentialgleichungen für harmonische Vorgänge	28
1.4.3 Komplexer Frequenzgang	29
1.4.4 Ortskurve	30
1.4.5 Bode-Diagramm	31
1.4.5.1 Amplitudengang	31
1.4.5.2 Phasengang	32
1.4.5.3 Grafische Darstellung des Bode-Diagrammes	32
1.4.6 Technische Schwingungen	37
1.4.6.1 Technische Systeme mit kinematischer Kopplung	38
1.4.6.2 Technische Systeme mit dynamischer Kopplung	43
1.5 Instationäres Verhalten technischer Systeme	46
1.5.1 Komplexe Exponentialfunktion und die komplexe Frequenz	46
1.5.2 Komplexe Übertragungsfunktion (Systemfunktion)	49
1.5.3 Pole und Nullstellen	50
1.6 Laplace-Transformation	52
1.7 Zusammenfassung	54
<b>2 Analogelektronik</b>	<b>55</b>
2.1 Spannungsteiler	55
2.1.1 Unbelasteter fester Spannungsteiler	55
2.1.2 Unbelastete variable Spannungsteilerschaltung	56
2.1.3 Belasteter fester Spannungsteiler	57

2.1.4	Belasteter variabler Spannungsteiler (belastetes Potentiometer)	58
2.1.5	Frequenzkompensierter Spannungsteiler	58
2.2	Gleichstrombrückenschaltungen	60
2.2.1	Brückenschaltungen mit Konstantspannungsquellen	60
2.2.2	Brückenschaltungen mit Konstantstromquellen	64
2.3	Wechselstrombrückenschaltungen	66
2.4	Operationsverstärker	67
2.4.1	Allgemeines und Schaltsymbole des Operationsverstärkers	67
2.4.2	Spannungsversorgung (Stromversorgung, power supply)	68
2.4.3	Idealer und realer Operationsverstärker	69
2.4.3.1	Offsetspannung	71
2.4.4	Analoge Schaltungen mit Operationsverstärkern	72
2.4.4.1	Nichtinvertierender Verstärker	72
2.4.4.2	Impedanzwandler (Spannungsfollower)	72
2.4.4.3	Invertierender Verstärker	73
2.4.4.4	Strom/Spannungs-Wandler	73
2.4.4.5	Differenzverstärker (Subtrahierer)	74
2.4.4.6	Instrumentenverstärker	75
2.4.4.7	Addierer (Summierer)	75
2.4.4.8	Differentiator (Differenzierer)	76
2.4.4.9	Integrator (Integrierer)	77
2.4.4.10	Logarithmierverstärker	77
2.5	Analoge Filter	80
2.6	Umsetzer	86
2.6.1	Digital/Analog-Umsetzer	88
2.6.1.1	Digital/Analog-Umsetzung über PWM	92
2.6.2	Analog/Digital-Umsetzer	93
2.6.2.1	ADCs nach dem Zählverfahren	93
2.6.2.2	ADCs nach dem Wägeverfahren (SAR-Converter)	94
2.6.2.3	ADCs nach dem Parallelverfahren (Flash-Converter)	94
2.6.2.4	ADCs nach dem Kaskadenverfahren (Pipeline-Converter)	94
2.6.2.5	ADCs nach dem 1-Rampen-Verfahren (Single-Slope-Converter)	95
2.6.2.6	ADCs nach dem 2-Rampen-Verfahren (Dual-Slope-Converter)	95
2.6.2.7	ADCs nach dem Sigma-Delta-Verfahren ( $\Sigma$ - $\Delta$ -Converter)	95
2.7	Trägerfrequenzverstärker	96
<b>3</b>	<b>Leistungselektronik</b>	<b>103</b>
3.1	Steuerbare Leistungshalbleiter	103
3.2	Leistungsdioden	107
3.3	Anforderungen an die Ansteuerung der Leistungshalbleiter	108
3.4	Transistorschaltstufen	109
3.5	Ansteuerschaltungen für Leistungs-MOSFETs und IGBTs	109
3.6	Brückenschaltungen mit Transistoren	113
3.7	Endstufenansteuerung über PWM-Signal	115
<b>4</b>	<b>Sensoren</b>	<b>119</b>
4.1	Grundbegriffe	119
4.1.1	Signalformen	119
4.1.2	Vom Elementarsensor zum Sensorsystem	122
4.1.3	Messtechnische Eigenschaften von Sensoren	123
4.1.3.1	Messabweichung	123
4.1.3.2	Statische Eigenschaften	124
4.1.3.3	Dynamische Eigenschaften	129
4.1.4	Gesichtspunkte zur Auswahl von Sensoren	140

4.1.5	Eichen und Kalibrieren . . . . .	141
4.2	Mechanoresistive Sensoren . . . . .	142
4.2.1	Positionsesistive Messwertaufnehmer (oder potentiometrische Messwertaufnehmer) . . . . .	142
4.2.2	Dehnungsesistive Messwertaufnehmer . . . . .	145
4.3	Elektromagnetische Sensoren . . . . .	154
4.3.1	Induktionsmesswertaufnehmer . . . . .	154
4.3.1.1	Elektromagnetische Drehzahlaufnehmer (Pick up) . . . . .	154
4.3.1.2	Elektrodynamische Schwingungsaufnehmer . . . . .	157
4.3.1.3	Differentialtransformator . . . . .	157
4.3.1.4	Resolver . . . . .	159
4.3.1.5	Inductosyn . . . . .	160
4.3.2	Induktive Messwertaufnehmer . . . . .	160
4.3.2.1	Induktive Längsanker-Messwertaufnehmer . . . . .	161
4.3.2.2	Induktive Queranker-Messwertaufnehmer . . . . .	164
4.3.3	Wirbelstromaufnehmer . . . . .	166
4.3.4	Näherungsschalter (Initiatoren) . . . . .	168
4.4	Magnetfeldsensoren . . . . .	171
4.4.1	Wiegand-Sensoren und Impulsdrähte . . . . .	171
4.4.2	Galvanomagnetische Sensoren . . . . .	173
4.4.2.1	Hall-Messwertaufnehmer (Magnetoelektropotential-Elementarsensor) . . . . .	175
4.4.2.2	Feldplatten (magnetoresistive Elementarsensoren) . . . . .	179
4.4.2.3	Magnetoresistive Metall-Dünnschicht-Messwertaufnehmer . . . . .	184
4.4.3	Magnetoinduktive Sensoren . . . . .	185
4.4.3.1	Magnetoinduktive Wegaufnehmer . . . . .	185
4.4.3.2	Magnetoinduktive Drehzahlaufnehmer . . . . .	189
4.4.3.3	Magnetoinduktive Stromaufnehmer . . . . .	191
4.5	Magnetoelastische Sensoren . . . . .	191
4.5.1	Pressduktor . . . . .	192
4.5.2	Magnetoelastischer Induktivaufnehmer . . . . .	193
4.5.3	Magnetoelastischer Druckaufnehmer . . . . .	193
4.5.4	Magnetoelastischer Drehmomentaufnehmer . . . . .	194
4.6	Kapazitive Sensoren . . . . .	197
4.6.1	Kapazitive Differentialwegaufnehmer . . . . .	198
4.6.2	Kapazitive Druckaufnehmer . . . . .	198
4.6.3	Kapazitiver Füllstandaufnehmer . . . . .	199
4.6.4	Kapazitive Näherungsschalter . . . . .	201
4.6.5	Elektronische Signalanpassung . . . . .	203
4.7	Piezoelektrische Sensoren . . . . .	204
4.7.1	Piezoelektrische Aufnehmer . . . . .	209
4.7.1.1	Piezoelektrische Kraftaufnehmer . . . . .	210
4.7.1.2	Piezoelektrische Druckaufnehmer . . . . .	210
4.7.1.3	Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer . . . . .	211
4.7.1.4	Piezoelektrische Kraftdruckaufnehmer . . . . .	212
4.7.2	Elektronische Signalanpassung . . . . .	213
4.8	Temperatursensoren . . . . .	217
4.8.1	Kontaktthermometrische Sensoren . . . . .	218
4.8.1.1	Widerstandsthermometer (thermoresistiver Elementarsensor) . . . . .	218
4.8.1.2	Thermoelemente . . . . .	221
4.8.2	Strahlungsthermometrie . . . . .	225
4.8.2.1	Gesamtstrahlungspyrometer . . . . .	225
4.8.2.2	Teilstrahlungspyrometer . . . . .	226
4.9	Optoelektronische Sensoren . . . . .	226
4.9.1	Fotoelektrische Empfänger (Messwertaufnehmer) . . . . .	229

4.9.1.1	Fotozelle	229
4.9.1.2	Fotomultiplier (Sekundärelektronen-Vervielfacher)	230
4.9.1.3	Fotowiderstand	230
4.9.1.4	Fotodiode und Fotoelement	231
4.9.1.5	Positionempfindliche Fotodioden	234
4.9.1.6	CCD-Bildsensoren	235
4.9.2	Optische Sender	235
4.9.3	Lichtwellenleiter	235
4.9.4	Lichtoptische Sensoren	237
4.9.4.1	Lichtschranken	237
4.9.4.2	Reflexastköpfe	239
4.9.4.3	Inkrementale Sensoren	240
4.9.5	Hybridoptische Sensoren	242
4.9.6	Faseroptische Sensoren	245
4.10	Ultraschallsensoren	251
4.10.1	Physikalische Grundlagen	252
4.10.2	Ultraschallabstandssensoren	253
4.11	Pneumatische Sensoren	254
4.11.1	Staudruck-Messwertaufnehmer (Staudüse)	254
4.11.2	Ringstrahl-Messwertaufnehmer (Ringstrahldüse)	255
4.11.3	Pneumatische Luftschranken	256
<b>5</b>	<b>Aktoren</b>	<b>259</b>
5.1	Einführung in die Aktuatorik	259
5.1.1	Übersicht von physikalisch verschiedenen Aktoren	260
5.1.2	Definition eines Aktors	260
5.2	Festkörperaktoren: piezoelektrische und magnetostriktive Steller	262
5.2.1	Piezostelltechnik	262
5.2.1.1	Piezoeffekt und seine Eigenschaften	262
5.2.1.2	Hauptanwendungsgebiete	264
5.2.2	Grundlagen der Piezosteller	264
5.2.2.1	Ausdehnung des PZT – Nichtlinearität, Hysterese und Drift	265
5.2.2.2	Aktiv erzeugte Kraft	267
5.2.2.3	Dynamischer Betrieb, Resonanzfrequenzen und Zeitkonstanten	267
5.2.2.4	Temperaturverhalten	268
5.2.2.5	Erwärmung des Piezotranslators	269
5.2.2.6	Einsatz im Vakuum	269
5.2.2.7	Mechanische Einbauvorschriften	269
5.2.3	Ansteuerung von Piezotranslatoren	270
5.2.4	Positionsregelung mit Piezotranslatoren	270
5.2.5	Anwendungsbeispiele	270
5.2.5.1	Piezoelektrische Kippspiegel	270
5.2.5.2	Piezoelektrische Stelltische	272
5.2.5.3	Hexapod als Vibrationsisolator und Stellplattform	272
5.2.5.4	Piezowanderantrieb (Piezo-Walk-Drive, PWD)	274
5.2.6	Magnetostriktive Aktoren	274
5.2.7	Weitere Festkörperaktoren	276
5.2.8	Aktoren auf fluider und gasförmiger (chemischer) Basis	276
5.3	Elektromagnetisch-mechanische Aktoren	277
5.3.1	Einführung	277
5.3.2	Allgemeines über elektrische Antriebstechnik	278
5.3.3	Berechnung eines Hubmagneten	278
5.3.3.1	Durchflutungsberechnung	280
5.3.3.2	Hubmagnet-Kraftberechnung	283

5.3.4	Typen elektrischer Motoren . . . . .	284
5.3.5	Gleichstrommotor (GSM) . . . . .	284
	5.3.5.1 Gleichstrom-Nebenschlussmaschine (GS-NSM) . . . . .	285
	5.3.5.2 Gleichstrom-Reihenschlussmaschine (GS-RSM) . . . . .	285
	5.3.5.3 Universalmotor . . . . .	291
	5.3.5.4 Elektronikmotor (EC-Motor) . . . . .	291
	5.3.5.5 Schrittmotor . . . . .	297
5.3.6	Wechselstrom- und Drehstrommaschinen . . . . .	301
	5.3.6.1 Asynchronmaschine (ASM) . . . . .	301
	5.3.6.2 Synchronmaschine . . . . .	302
5.3.7	Linearmotoren (LM) . . . . .	302
5.3.8	Servoaktoren, Servomotoren für Servoantriebe . . . . .	302
5.4	Arbeitspunkt im 4-Quadranten-Betrieb, Nennbetrieb und Typenschild . . . . .	304
	5.4.1 Definition des Begriffs Arbeitspunkt (AP) durch die Wirkungskausalkette . . . . .	304
	5.4.2 4-Quadranten-Betrieb . . . . .	308
	5.4.3 Nennbetrieb, Leistungs- bzw. Typenschild . . . . .	309
	5.4.4 Wirkungsgrad und Leistungsgrenzen . . . . .	310
5.5	Leistungselektronische Umrichter für mechatronische Aktoren . . . . .	311
	5.5.1 Einleitung . . . . .	311
	5.5.2 Stromrichterschaltungen . . . . .	312
	5.5.2.1 Gleich-, Wechsel- und Umrichter . . . . .	312
	5.5.2.2 Zwischenkreisumrichter . . . . .	312
	5.5.2.3 Stromrichterspeisung für Synchron- und Asynchronmotoren . . . . .	316
	5.5.2.4 Pulsumrichter mit Spannungszwischenkreis . . . . .	317
	5.5.2.5 GTO-Stromrichter (Gate-Turn-Thyristor) . . . . .	319
	5.5.2.6 Direktumrichter . . . . .	320
	5.5.2.7 Untersynchrone Stromrichtererkaskade für Schleifringläufer (ASM-SRL) . . . . .	323
	5.5.2.8 Netzseitige Stromrichter . . . . .	323
5.6	Projektierungsvorschläge . . . . .	324
	5.6.1 Nennleistung bzw. Bemessungsleistung . . . . .	324
	5.6.2 Drehmoment . . . . .	324
	5.6.3 Drehzahlstellbereich . . . . .	325
	5.6.4 Umgebungsbedingungen . . . . .	326
	5.6.5 Netzbedingungen . . . . .	327
5.7	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Redundanz . . . . .	328
	5.7.1 Standardwerte zur Ausfall- und Verfügbarkeitsberechnung . . . . .	328
	5.7.2 Weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Verfügbarkeit . . . . .	329
	5.7.3 Auswahlkriterien für Antriebssysteme . . . . .	329
5.8	Dynamisches Verhalten, Hochlaufbetrieb und Thermodynamik . . . . .	332
	5.8.1 Newton'sches Aktionsprinzip . . . . .	332
	5.8.1.1 Linearer Hochlauf (Rampen-Zeit-Funktion) . . . . .	333
	5.8.1.2 Exponentieller Hochlauf . . . . .	334
	5.8.2 Thermodynamik, Erwärmung und Abkühlung . . . . .	334
5.9	Normrichtlinien: Bauformen, Schutzarten, Kühlung und Isolation . . . . .	337
	5.9.1 Bauformen . . . . .	337
	5.9.2 Schutzarten, Schutzgrade . . . . .	337
	5.9.3 Kühlung . . . . .	339
	5.9.4 Isolation . . . . .	339
5.10	Hydraulische Antriebstechnik . . . . .	339
	5.10.1 Übersicht . . . . .	339
	5.10.2 Grundlagen . . . . .	340
	5.10.3 Bauelemente hydrostatischer Antriebe . . . . .	342
	5.10.4 Ventile . . . . .	344
	5.10.5 Arbeitszylinder . . . . .	347

5.10.6	Verbindungselemente	347
5.10.7	Dichtelemente	347
5.10.8	Hydrostatische Getriebe	347
5.10.9	Speicher	349
5.10.10	Bauelemente hydrodynamischer Antriebe	349
5.11	Pneumatische Antriebstechnik	353
5.11.1	Eigenschaften	354
5.11.2	Anwendungen	354
5.11.3	Bauelemente	354
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>357</b>
<b>Weiterführende Literatur</b>		<b>359</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>361</b>