

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Grundlagen	13
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
2 Analogelektronik	55
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 (Σ - Δ -Converter)	95
2.7	Trägerfrequenzverstärker	96
3	Leistungselektronik	103
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
4	Sensoren	119
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
5	Aktoren	259
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 magnetostruktive 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	Magnetostruktive 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 Begriffes 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
Literaturverzeichnis		357
Weiterführende Literatur		359
Stichwortverzeichnis		361