

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 1. Auflage	5
Vorwort zur 2., verbesserten Auflage	6
1 Mathematik	19
1.1 Komplexe Zahlen	19
1.1.1 Definition komplexer Zahlen	19
1.1.2 Darstellungsformen	19
1.1.2.1 Komplexe Zahlenebene	19
1.1.2.2 Polarformen	20
1.1.3 Rechenoperation mit komplexen Zahlen	21
1.1.3.1 Addition und Subtraktion	21
1.1.3.2 Multiplikation	21
1.1.3.3 Division	21
1.2 Matrizen	22
1.2.1 Quadratische Matrix	22
1.2.2 Symmetrische Matrix	22
1.2.3 Transponierte Matrix	23
1.2.4 Spaltenvektor	23
1.2.5 Zeilenvektor	23
1.2.6 Nullvektor 0	23
1.2.7 Einheitsmatrix I	23
1.3 Rechenregeln für Matrizen	24
1.3.1 Addition von Matrizen	24
1.3.2 Vektorrechnung	24
1.3.3 Skalares Produkt	25
1.3.4 Vektorprodukt	25
1.3.5 Multiplikation einer Matrix mit einem Skalar	26
1.3.6 Matrizenmultiplikation	26
1.3.7 Wichtige Gesetze für Matrizen	26
1.3.8 Determinante	26
1.3.9 Inverse Matrix	27
1.3.10 Darstellung von linearen Gleichungssystemen mithilfe von Matrizen	28
1.3.11 Eigenwerte und Eigenvektoren	29
1.4 Numerische Integration	30
1.4.1 Simpson'sche Formel	30
1.4.2 Summierende Simpson'sche Formel	31

1.5	Laplace-Transformation	31
1.5.1	Linearitätssatz	31
1.5.2	Verschiebungssatz	32
1.5.3	Dämpfungssatz	32
1.5.4	Integrationssatz	32
1.5.5	Differenziationssatz	32
1.5.6	Faltungssatz	32
1.5.7	Inverse Laplace-Transformation (Rücktransformation in den Zeitbereich)	33
1.6	Fourier-Transformation	37
1.7	Fourier-Reihen	38

2 Regelungstechnik 41

2.1	Regelsysteme	41
2.1.1	Gegenkopplung, ein universelles Prinzip	41
2.1.2	Struktur einer Regelung	43
2.1.3	Anforderungen an eine Regelung	46
2.2	Regelstrecke	49
2.2.1	Modellbildung	49
2.2.1.1	Experimentelle Modellbildung	49
2.2.1.2	Theoretische Modellbildung	50
2.2.2	Klassifikation des Übertragungsverhaltens	52
2.2.3	Linearisierung um den Arbeitspunkt	53
2.2.4	Darstellung von LZI-Systemen	57
2.2.4.1	Differenzialgleichung	57
2.2.4.2	Übertragungsfunktion	57
2.2.4.3	Zustandsraumdarstellung	59
2.2.4.4	Umformung des Wirkungsplans	62
2.3	Analyse der Regelstrecke	68
2.3.1	Dynamisches Grundverhalten	69
2.3.1.1	Beschreibung des Zeitverhaltens	69
2.3.1.2	P-T ₁ -Verhalten	70
2.3.1.3	P-T ₂ -Verhalten	71
2.3.1.4	P-T _n -Verhalten	73
2.3.1.5	Kurzkennzeichnungen	73
2.3.2	Analyse der Übertragungsfunktion	74
2.3.2.1	Stabilität	75
2.3.2.2	Anfangs- und Endwert	76
2.3.2.3	Übergangsverhalten	77
2.3.2.4	Einfluss der Zählernullstellen	79
2.3.2.5	Abschätzung des Streckenverhaltens	79
2.3.3	Analyse im Zustandsraum	81
2.3.3.1	Eigenwerte	81
2.3.3.2	Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit	82
2.4	Regler	83

2.4.1	P-Regler	83
2.4.2	PI-Regler	85
2.4.3	PID-Regler	86
2.4.4	Schaltregler	88
2.4.4.1	Zweipunktregler	88
2.4.4.2	Dreipunktregler	90
2.5	Entwurf linearer Standardregler	91
2.5.1	Übertragungsfunktionen des Regelkreises	91
2.5.2	Wurzelortskurve	92
2.5.3	Frequenzgangsentwurf	94
2.5.4	Einstellregeln	97
2.5.4.1	Einstellung nach Ziegler-Nichols	98
2.5.4.2	Einstellung nach der Summenzeitkonstante	99
2.5.4.3	Betragsoptimum und symmetrisches Optimum ..	100
2.5.5	Erweiterte Regelkreisstrukturen	102
2.5.5.1	Führungsfilter	102
2.5.5.2	Kaskadenregelung	103
2.6	Digitalregler	104
2.6.1	Struktur und Elemente des Abtastregelkreises	104
2.6.2	Quasikontinuierlicher Entwurf	105
2.7	Entwurf von Zustandsreglern	106
2.7.1	Struktur und Wirkung eines Zustandsreglers	107
2.7.2	Entwurf eines allgemeinen Polvorgabereglers	108
2.7.3	Zustandsbeobachter	110
	Literatur	111

3 Analogtechnik **112**

3.1	Analoge Schaltungen in der Mechatronik	112
3.2	Verstärkergrundschaltungen	113
3.2.1	Prinzip der Verstärkung mit Transistoren	113
3.2.2	Differenzverstärker	115
3.3	Operationsverstärker (OPV)	117
3.3.1	Reale OPV und nichtideale Eigenschaften	118
3.3.1.1	Frequenzgang	119
3.3.1.2	Offsetspannung	120
3.3.1.3	Gleichtaktverstärkung	120
3.3.1.4	Eingangs- und Ausgangswiderstände	121
3.3.2	Typische Kennwerte realer OPV	121
3.4	Grundschaltungen des OPV	122
3.4.1	Invertierender Verstärker	122
3.4.2	Nichtinvertierender Verstärker	124
3.5	Analogrechenschaltungen	125
3.5.1	Subtrahier- und Summationsverstärker	125
3.5.2	Instrumentenverstärker	127
3.5.3	Analoge Multiplizierer und Dividierer	129

3.5.4	Differenzier- und Integrierglieder	129
3.5.5	Exponential- und Logarithmierglieder	130
Literatur		131

4 Digitaltechnik 132

4.1	Schalterlogik und binäre Signale	132
4.1.1	Gesteuerte Schalter und Logikpegel	132
4.1.2	Logikdefinitionen und -funktionen	133
4.2	Boole'sche Algebra	135
4.2.1	Variablendefinition und Verknüpfungen	135
4.2.2	Postulate der Boole'schen Algebra	136
4.2.3	Rechenregeln der Boole'schen Algebra	137
4.2.4	Boole'sche Gleichungen und Logikgatter	137
4.3	Das Transmissionsgatter	139
4.4	Kombinatorische Schaltungen	140
4.4.1	Allgemeines	140
4.4.2	Optimierung von Schaltfunktionen	141
4.4.2.1	Minimierung einer AND-OR-Schaltfunktion	141
4.4.2.2	Realisierung auf Gatterniveau	143
4.4.2.3	Aktuelle Aspekte	143
4.4.3	Codierschaltungen (Codierer und Decoder)	144
4.4.4	Multiplexer und Demultiplexer	146
4.4.5	Rechenschaltungen	147
4.4.5.1	Addierer	148
4.4.5.2	Subtrahierer	149
4.4.5.3	Komparatoren	149
4.4.5.4	Multiplizierer und Dividierer	150
4.4.6	Festwertspeicher	151
4.5	Flipflops	152
4.5.1	Allgemeines	152
4.5.2	Ungetaktete Flipflops	152
4.5.3	Taktzustandsgesteuertes D-Flipflop	153
4.5.4	Flankengesteuertes D-Flipflop	154
4.5.5	Weitere Arten flankengesteuerter Flipflops	156
4.6	Praktische sequenzielle Schaltungen	158
4.6.1	Register	158
4.6.2	Zähler und Teiler	159
4.6.2.1	Asynchrone Zähler und Teiler	160
4.6.2.2	Synchrone Zähler	160
4.6.3	Synchrone sequenzielle Schaltungen als Zustandsmaschinen	161
4.6.3.1	Moore-Automat	161
4.6.3.2	Mealy-Automat	162
4.6.3.3	Methodisches Beispiel	163
4.7	Realisierungen digitaler Schaltungen	165

4.7.1	Standard-Logikbausteine	165
4.7.2	Programmierbare Logikbausteine (PLD)	166
4.7.3	Anwenderspezifische Schaltkreise	170
Literatur		170

5 Leistungselektronik 171

5.1	Elektronische Ventile	171
5.1.1	Leistungsdioden	172
5.1.2	Thyristor	173
5.1.3	Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO)	174
5.1.4	Bipolartransistor	174
5.1.5	MOSFET	175
5.1.6	Insulated-Gate-Bipolartransistor (IGBT)	175
5.2	Selbstgeführte Stromrichter	176
5.2.1	Tiefsetzsteller	176
5.2.2	Vierquadrantensteller	179
5.2.2.1	Gleichzeitige Taktung	180
5.2.2.2	Alternierende Taktung	180
5.2.3	Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung	181
5.2.4	Pulsbreitenmodulation (PBM)	184
5.2.5	Modellbildung von dreiphasigen Stromrichtern	186
Literatur		188

6 Modellbildung 189

6.1	Grundbegriffe	189
6.2	Modellierungs- und Simulationsprozess	190
6.2.1	Zyklen	190
6.2.2	Modellerstellung und -verfeinerung	192
6.3	Modellansätze	193
6.4	Modellklassen	194
6.5	Beschreibungsmittel	195
6.5.1	Beschreibung im Zeitbereich	195
6.5.2	Beschreibung im Bildbereich	197
6.5.3	Grafische Beschreibung	197
6.6	Modellelemente	199
6.6.1	Steuerungs- und Regelungstechnik	199
6.6.2	Mechanik	201
6.6.3	Elektrotechnik	202
6.6.4	Mechanische und elektrische Analogien	204
6.7	Methoden und Werkzeuge der Modellbildung	206
6.7.1	Analytische Methoden	206
6.7.1.1	Mechanik	208
6.7.1.2	Elektrotechnik	210
6.7.2	Synthetische Methoden	213

6.7.2.1	Mechanik	213
6.7.2.2	Elektrotechnik	215
6.7.2.3	Bondgrafen	216
6.7.3	Experimentelle Modellbildung	216
6.7.3.1	Datenerhebung	218
6.7.3.2	Festlegung der Modellstruktur	219
6.7.3.3	Parameteridentifikation	221
6.8	Werkzeuge der Modellbildung	222
	Literatur	223

7 Mechanische Systeme 224

7.1	Modelle in der Mechanik	224
7.2	Kinematik	226
7.2.1	Einführung	226
7.2.2	Kinematik des Massenpunktes	226
7.2.2.1	Darstellung der Bewegung in kartesischen Koordinaten	226
7.2.2.2	Darstellung der Bewegung eines Massenpunktes in Zylinderkoordinaten	229
7.2.2.3	Darstellung der Bewegung eines Massenpunktes in Kugelkoordinaten	230
7.2.3	Kinematik des starren Körpers	231
7.2.3.1	Notation	231
7.2.3.2	Translation und Rotation	232
7.2.3.3	Euler-Winkel	234
7.2.4	Kinematik des Mehrkörpersystems	235
7.2.4.1	Klassifikation	235
7.2.4.2	Holonyme Starrkörpersysteme mit kinematischer Baumstruktur	236
7.2.4.3	Denavit-Hartenberg-Notation	237
7.3	Kinetik	240
7.3.1	Einführung	240
7.3.2	Kinetik des Massenpunktes	241
7.3.2.1	Impulssatz	241
7.3.2.2	Drehimpulssatz	244
7.3.2.3	Arbeitssatz	244
7.3.2.4	Energiesatz	245
7.3.3	Kinetik des starren Körpers	246
7.3.3.1	Schwerpunktsatz	246
7.3.3.2	Drehimpulssatz	246
7.3.3.3	Arbeitssatz	249
7.3.3.4	Energiesatz	249
7.3.4	Kinetik des Mehrkörpersystems	253
7.3.4.1	Prinzip von d'Alembert	253
7.3.4.2	Lagrange'sche Gleichungen 2. Art	254

7.3.5	Der Lagrange-Formalismus für elektromechanische Systeme	258
7.4	Schwingungstechnik	260
7.4.1	Freie gedämpfte Schwingungen	260
7.4.1.1	Starke Dämpfung, Kriechfall ($D > 1$)	261
7.4.1.2	Mittlere Dämpfung, Aperiodischer Grenzfall ($D = 1$)	262
7.4.1.3	Schwache Dämpfung, Schwingfall ($D < 1$)	262
7.4.2	Erzwungene gedämpfte Schwingungen	265
7.4.2.1	Klassifizierung der erzwungenen Schwingungen nach dem Ort der Erregung	265
7.4.2.2	Partikuläre Lösung der Schwingungs-differenzialgleichung	267
7.4.2.3	Vergrößerungsfunktionen und Phasenwinkel ...	268
Literatur		271

8 Sensoren 272

8.1	Allgemeiner Aufbau	272
8.1.1	Beschreibungen	273
8.1.1.1	Messgrößen und Maßeinheiten	273
8.1.1.2	Kenngrößen	274
8.1.1.3	Statisches Verhalten	275
8.1.1.4	Dynamisches Verhalten	276
8.1.2	Anforderungen	278
8.2	Einteilung von Sensoren	279
8.3	Direkt umsetzende Sensoren	281
8.3.1	Aktive Sensoren	281
8.3.1.1	Piezoelektrischer Effekt	281
8.3.1.2	Elektrodynamischer Effekt	282
8.3.1.3	Fotoelektrischer Effekt	283
8.3.1.4	Seebeck-Effekt	284
8.3.1.5	Elektrochemischer-Effekt	285
8.3.2	Passive resistive Sensoren	286
8.3.2.1	Potenziometrische Sensoren	286
8.3.2.2	Dehnungsmessstreifen (DMS)	287
8.3.2.3	Fotowiderstand	288
8.3.2.4	Widerstandsthermometer	288
8.3.2.5	Feldplatte	290
8.3.2.6	Gasdetektor	291
8.3.3	Passive kapazitive Sensoren	291
8.3.3.1	Geometrische Effekte	291
8.3.3.2	Dielektrizitätseffekte	292
8.3.3.3	Näherungsschalter	293
8.3.3.4	Feuchtemessung	294
8.3.4	Passive induktive Sensoren	295

	8.3.4.1	Positionsmessung	295
	8.3.4.2	Näherungsschalter	295
8.4		Indirekt umsetzende Sensoren	296
	8.4.1	Weg, Strecke	296
	8.4.1.1	Triangulation	296
	8.4.1.2	Ultraschall	297
	8.4.1.3	Magnetostriktion	298
	8.4.1.4	Optisch	299
	8.4.2	Füllstand	301
	8.4.2.1	Radioaktiv	301
	8.4.2.2	Schwinggabelsensor	302
	8.4.3	Geschwindigkeit	303
	8.4.3.1	Impulszählung	303
	8.4.3.2	Korrelation	304
	8.4.4	Druck und Kraft	304
	8.4.4.1	Dehnungsmessstreifen (DMS)	304
	8.4.4.2	Magnetoelastisch	305
	8.4.5	Beschleunigung	306
	8.4.6	Durchfluss	307
	8.4.6.1	Druckdifferenz	307
	8.4.6.2	Hitzdraht	308
	8.4.6.3	Magnetisch-induktiv	309
	8.4.7	Magnetfeld	309
	8.4.7.1	Hall-Sonde	309
	8.4.7.2	Sättigungskernsonde	310
	8.4.8	Temperatur	311
	8.4.9	Konzentration	312
	8.4.9.1	λ -Sonde	312
	8.4.9.2	Ionensensitive Feldeffekttransistoren	313
		Literatur	314

9 Elektrische Aktoren **315**

9.1	Gleichstrommaschine (GM)	316
9.1.1	Aufbau der Antriebsstruktur	316
9.1.2	Analyse der Strecke	317
9.1.3	Berechnung des Ankerstromreglers	319
9.1.4	Berechnung des Drehzahlreglers	322
9.2	Feldorientierte Steuerung einer Synchronmaschine (SM)	323
9.2.1	Beschreibung der Synchronmaschine im rotorfesten Bezugssystem	325
9.2.2	Berechnung des inneren Drehmoments	326
9.2.3	Struktur der läuferflussorientierten Regelung	328
9.2.4	Berechnung der Stromregler	330
9.3	Hubmagnet	332
9.4	Schrittmotor	336

9.4.1	Vollschrittbetrieb	339
9.4.2	Halbschrittbetrieb	339
9.4.3	Start-Stopp-Rampe	340
9.4.4	Stromregelung	341
9.5	Asynchronmaschine (ASM)	343
	Literatur	348

10 Hydraulische Aktoren 349

10.1	Vor- und Nachteile hydraulischer Antriebe	349
10.2	Zahnradpumpe mit Außenverzahnung	350
10.3	Flügelzellenpumpe	351
10.4	Axialkolbenpumpe	351
10.5	Ventil	352
10.5.1	Proportionalventil	352
10.5.2	Servventil	353
10.6	Hydraulik-Zylinder und -Motor	355
10.6.1	Hydraulisches Teilmodell	356
10.6.2	Vereinfachtes Modell	361
10.7	Steuerung und Regelung	364
10.7.1	Istwerterfassung	364
10.7.2	Steuerung	364
10.7.3	Regelung	364
10.8	Auslegen eines hydraulischen Antriebes	365
	Literatur	366

11 Pneumatische Aktoren 367

11.1	Erzeugung und Aufbereitung der Druckluft	367
11.2	Wegeventil	368
11.3	Zylinder und Greifer	369
11.3.1	Zylinder mit Kolbenstange	369
11.3.2	Kolbenstangenlose Zylinder	369
11.4	Greifer	370
11.5	Steuerung und Regelung	375
11.5.1	Analoge Wegerfassung	375
11.5.2	Digitale Wegerfassung	377
11.6	Steuerung	378
11.7	Regelung	378
11.8	Pneumatisches Handhabungsgerät	378
11.9	Auslegung eines pneumatischen Antriebs	380
	Literatur	381

12 Informatik (Computer Science) 382

12.1	Gegenstand	382
------	------------------	-----

12.2	Grundlagen der Informationsverarbeitung	383
12.2.1	Daten, Zeichen, Maschinenwort	383
12.2.2	Zahlensysteme	385
12.2.3	Darstellung von Zeichen, Ziffern und Zahlen	386
12.2.3.1	Darstellung von alphanumerischen Zeichen	387
12.2.3.2	Darstellung von Ziffern	387
12.2.3.3	Darstellung von Zahlen	388
12.3	Programmierung und Softwareentwicklung	390
12.3.1	Algorithmen und Notationen	390
12.3.2	Variable, Ausdrücke und Zuweisungen	391
12.3.3	Zusammengesetzte Datentypen	392
12.3.4	Zeigervariablen	393
12.3.5	Datenstrukturen	393
12.3.6	Programmierung und Softwareentwicklung	394
12.3.7	Programmiersprachen	394
12.3.8	Programmierparadigmen	396
12.3.9	Entwicklungswerkzeuge	399
12.4	Struktur und Organisation von Rechnern	400
12.4.1	Von-Neumann-Rechnerkonzept	400
12.4.2	Komponenten	401
12.4.3	Schnittstellen	402
	Literatur	403

13 Mikrorechentechnik 404

13.1	Aufbau und Organisation von Mikrorechnern	406
13.2	Arbeitsweise eines Mikrorechners	407
13.2.1	Befehlssatzarchitektur	408
13.2.2	Adressierungsarten	409
13.2.3	Befehlsformat	410
13.2.4	Komplexität von Befehlssätzen	411
13.2.5	Optimierungstechniken	412
13.3	Peripheriebausteine	415
13.4	Eingebettete Systeme	417
13.4.1	Universalprozessoren	417
13.4.2	Mikrocontroller (μC)	418
13.4.3	Digitale Signalprozessoren (DSP)	420
13.5	Beispiele für Prozessoren	421
13.5.1	32-Bit-Mikrocontroller mit Cortex-M3-Kern	421
13.5.2	8086-kompatible Prozessoren	425
	Literatur	429

14 Mechatronische Systeme 430

14.1	Elektronischer Zündstartschalter	430
14.1.1	Funktionen	430

14.1.2	Mechanische Komponenten	432
14.1.3	Hardware-Komponente	435
14.1.4	Software-Komponente	436
14.2	Bedienfelder mit CAN-Elektronik	440
14.3	Einzelvernetzter Schalter „MAXIS“	441
14.3.1	Mechanischer Aufbau	441
14.3.2	Schaltssystem	442
14.3.3	Leiterplatte und Betätiger	443
14.3.4	Stecker	443
14.3.5	Elektronik	443
14.4	Piezo-Inline-Injektor	445
14.5	Getriebeautomatisierung am Beispiel Durashift EST	445
14.5.1	Systembeschreibung	445
14.5.2	Software	449
14.5.3	Vorteile des mechatronischen Konzepts	450
14.6	Antiblockiersystem (ABS)	451
14.7	Antriebsschlupfregelung (ASR)	452
14.8	Regelung der Fahrdynamik (ESP)	453
14.9	Kompensation mechanischer Fehler	456
14.10	Bewegen großer Lasten	458
Sachwortverzeichnis		459