

<b>1</b>	<b>Mathematik</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Regelungstechnik</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>Analogtechnik</b>	<b>113</b>
<b>4</b>	<b>Digitaltechnik</b>	<b>134</b>
<b>5</b>	<b>Leistungselektronik</b>	<b>174</b>
<b>6</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>193</b>
<b>7</b>	<b>Mechanische Systeme</b>	<b>231</b>
<b>8</b>	<b>Sensoren</b>	<b>285</b>
<b>9</b>	<b>Elektrische Aktoren</b>	<b>332</b>
<b>10</b>	<b>Hydraulische Aktoren</b>	<b>369</b>
<b>11</b>	<b>Pneumatische Aktoren</b>	<b>387</b>
<b>12</b>	<b>Informatik</b>	<b>401</b>
<b>13</b>	<b>Mikrorechentechnik</b>	<b>425</b>
<b>14</b>	<b>Mechatronische Systeme</b>	<b>455</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>488</b>

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Mathematik</b> .....	15
1.1	<i>Matrizenrechnung</i> .....	15
1.2	<i>Rechenregeln für Matrizen</i> .....	17
1.2.1	Addition von Matrizen .....	17
1.2.2	Vektorrechnung .....	17
1.2.3	Skalares Produkt .....	18
1.2.4	Vektorprodukt .....	18
1.2.5	Multiplikation einer Matrix mit einem Skalar .....	19
1.2.6	Matrizenmultiplikation .....	19
1.2.7	Wichtige Gesetze für Matrizen .....	19
1.2.8	Determinante .....	20
1.2.9	Inverse Matrix .....	21
1.2.10	Darstellung von linearen Gleichungssystemen mit Hilfe von Matrizen .....	21
1.2.11	Eigenwert und Eigenvektor .....	22
1.3	<i>Numerische Integration</i> .....	23
1.3.1	Simpson'sche Formel .....	24
1.3.2	Summierende Simpson'sche Formel .....	25
1.4	<i>Laplace-Transformation</i> .....	25
1.4.1	Linearitätssatz .....	26
1.4.2	Verschiebungssatz .....	26
1.4.3	Dämpfungssatz .....	26
1.4.4	Integrationsatz .....	26
1.4.5	Differenziationsatz .....	26
1.4.6	Faltungssatz .....	27
1.4.7	Inverse Laplace-Transformation (Rücktransformation in den Zeitbereich) .....	27
1.5	<i>Fourier-Transformation</i> .....	31
1.6	<i>Fourier-Reihen</i> .....	33
<b>2</b>	<b>Regelungstechnik</b> .....	36
2.1	<i>Regelungssysteme</i> .....	36
2.1.1	Gegenkopplung, ein universelles Prinzip .....	36
2.1.2	Struktur einer Regelung .....	38
2.1.3	Anforderungen an eine Regelung .....	42
2.2	<i>Regelstrecke</i> .....	45
2.2.1	Modellbildung .....	45
2.2.2	Klassifikation des Übertragungsverhaltens .....	49
2.2.3	Linearisierung um den Arbeitspunkt .....	50
2.2.4	Darstellung von LZI-Systemen .....	54

2.3	<i>Analyse der Regelstrecke</i> . . . . .	67
2.3.1	Dynamisches Grundverhalten . . . . .	67
2.3.2	Analyse der Übertragungsfunktion . . . . .	73
2.3.3	Analyse im Zustandsraum . . . . .	80
2.4	<i>Regler</i> . . . . .	82
2.4.1	P-Regler . . . . .	82
2.4.2	PI-Regler . . . . .	84
2.4.3	PID-Regler . . . . .	86
2.4.4	Schaltregler . . . . .	87
2.5	<i>Entwurf linearer Standardregler</i> . . . . .	89
2.5.1	Übertragungsfunktionen des Regelkreises . . . . .	89
2.5.2	Wurzelortskurve . . . . .	91
2.5.3	Frequenzgangsentwurf . . . . .	93
2.5.4	Einstellregeln . . . . .	96
2.5.5	Erweiterte Regelkreisstrukturen . . . . .	101
2.6	<i>Digitalregler</i> . . . . .	103
2.6.1	Struktur und Elemente des Abtastregelkreises . . . . .	103
2.6.2	Quasikontinuierlicher Entwurf . . . . .	105
2.7	<i>Entwurf von Zustandsreglern</i> . . . . .	106
2.7.1	Struktur und Wirkung eines Zustandsreglers . . . . .	106
2.7.2	Entwurf eines allgemeinen Polvorgabereglers . . . . .	108
2.7.3	Zustandsbeobachter . . . . .	110
<b>3</b>	<b>Analogtechnik</b> . . . . .	113
3.1	<i>Analoge Schaltungen in der Mechatronik</i> . . . . .	113
3.2	Verstärkergrundsaltungen . . . . .	114
3.2.1	Prinzip der Verstärkung mit Transistoren . . . . .	114
3.2.2	Differenzverstärker . . . . .	117
3.3	<i>Operationsverstärker (OPV)</i> . . . . .	119
3.3.1	Reale OPV und nichtideale Eigenschaften . . . . .	120
3.3.2	Typische Kennwerte realer OPV . . . . .	123
3.4	<i>Grundsaltungen des OPV</i> . . . . .	123
3.4.1	Invertierender Verstärker . . . . .	124
3.4.2	Nichtinvertierender Verstärker . . . . .	126
3.5	<i>Analogrechenaltungen</i> . . . . .	127
3.5.1	Subtrahier- und Summationsverstärker . . . . .	127
3.5.2	Instrumentenverstärker . . . . .	130
3.5.3	Analoge Multiplizierer und Dividierer . . . . .	131
3.5.4	Differenzier- und Integrierglieder . . . . .	132
3.5.5	Exponential- und Logarithmierglieder . . . . .	133
<b>4</b>	<b>Digitaltechnik</b> . . . . .	134
4.1	<i>Schalterlogik und binäre Signale</i> . . . . .	134

---

4.1.1	Gesteuerte Schalter und Logikpegel . . . . .	134
4.1.2	Logikdefinitionen und -funktionen . . . . .	135
4.2	<i>Boole'sche Algebra</i> . . . . .	137
4.2.1	Variablendefinition und Verknüpfungen . . . . .	137
4.2.2	Postulate der Boole'schen Algebra . . . . .	138
4.2.3	Rechenregeln der Boole'schen Algebra . . . . .	139
4.2.4	Boole'sche Gleichungen und Logikgatter . . . . .	139
4.3	<i>Das Transmissionsgatter</i> . . . . .	141
4.4	<i>Kombinatorische Schaltungen</i> . . . . .	142
4.4.1	Allgemeines . . . . .	142
4.4.2	Optimierung von Schaltfunktionen . . . . .	143
4.4.2.1	Minimierung einer AND-OR-Schalt- funktion . . . . .	143
4.4.2.2	Realisierung auf Gatterniveau . . . . .	145
4.4.2.3	Aktuelle Aspekte . . . . .	146
4.4.3	Codierschaltungen (Codierer und Decoder) . . . . .	147
4.4.4	Multiplexer und Demultiplexer . . . . .	149
4.4.5	Rechenschaltungen . . . . .	151
4.4.5.1	Addierer . . . . .	151
4.4.5.2	Subtrahierer . . . . .	152
4.4.5.3	Komparatoren . . . . .	153
4.4.6	Multiplizierer und Dividierer . . . . .	154
4.4.7	Festwertspeicher . . . . .	155
4.5	<i>Flipflops</i> . . . . .	156
4.5.1	Allgemeines . . . . .	156
4.5.2	Ungetaktete Flipflops . . . . .	156
4.5.3	Taktzustandsgesteuerte Flipflops . . . . .	157
4.5.4	Das flankengesteuerte D-Flipflop . . . . .	158
4.5.5	Weitere Arten flankengesteuerter Flipflops . . . . .	159
4.6	<i>Praktische sequenzielle Schaltungen</i> . . . . .	162
4.6.1	Register . . . . .	162
4.6.2	Zähler und Teiler . . . . .	164
4.6.2.1	Asynchrone Zähler und Teiler . . . . .	164
4.6.2.2	Synchrone Zähler . . . . .	165
4.6.3	Synchrone sequenzielle Schaltungen als Zustands- maschinen . . . . .	165
4.6.3.1	Moore-Automat . . . . .	166
4.6.3.2	Mealy-Automat . . . . .	167
4.6.3.3	Beispielentwurf . . . . .	167
4.7	<i>Realisierungen digitaler Schaltungen</i> . . . . .	170

<b>5</b>	<b>Leistungselektronik</b> .....	174
5.1	<i>Elektronische Ventile</i> .....	174
5.1.1	Leistungsdiode .....	175
5.1.2	Thyristor .....	176
5.1.3	Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO) .....	177
5.1.4	Bipolartransistor .....	178
5.1.5	MOSFET .....	178
5.1.6	Insulated-Gate-Bipolartransistor (IGBT) .....	179
5.2	<i>Selbstgeführte Stromrichter</i> .....	180
5.2.1	Tiefsetzsteller .....	180
5.2.2	Vierquadrantensteller .....	182
5.2.3	Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung .....	185
5.2.4	Pulsbreitenmodulation (PBM) .....	189
5.2.5	Modellbildung von dreiphasigen Stromrichtern .....	190
<b>6</b>	<b>Modellbildung</b> .....	193
6.1	<i>Modellierungs- und Simulationsprozess</i> .....	194
6.1.1	Zyklen .....	194
6.1.2	Modellerstellung und -verfeinerung .....	195
6.2	<i>Modellansätze</i> .....	197
6.3	<i>Modellklassen</i> .....	198
6.4	<i>Beschreibungsmittel</i> .....	200
6.4.1	Beschreibung im Zeitbereich .....	200
6.4.2	Beschreibung im Bildbereich .....	202
6.4.3	Grafische Beschreibung .....	202
6.5	<i>Modellelemente</i> .....	204
6.5.1	Steuerungs- und Regelungstechnik .....	204
6.5.2	Mechanik .....	206
6.5.3	Elektrotechnik .....	208
6.5.4	Mechanische und elektrische Analogien .....	209
6.6	<i>Methoden und Werkzeuge der Modellbildung</i> .....	212
6.6.1	Analytische Methoden .....	212
6.6.2	Synthetische Methoden .....	219
6.6.3	Experimentelle Modellbildung .....	224
6.6.4	Werkzeuge der Modellbildung .....	229
<b>7</b>	<b>Mechanische Systeme</b> .....	231
7.1	<i>Modelle in der Mechanik</i> .....	231
7.2	<i>Kinematik</i> .....	232
7.2.1	Einführung .....	232
7.2.2	Kinematik des Massenpunktes .....	233
7.2.2.1	Darstellung der Bewegung in kartesischen Koordinaten .....	233

	7.2.2.2	Darstellung der Bewegung eines Massenpunktes in Zylinderkoordinaten . . . . .	235
	7.2.2.3	Darstellung der Bewegung eines Massenpunktes in Kugelkoordinaten . . . . .	237
	7.2.3	Kinematik des starren Körpers . . . . .	238
	7.2.4	Kinematik des Mehrkörpersystems . . . . .	242
7.3	<i>Kinetik</i>	. . . . .	248
	7.3.1	Einführung . . . . .	248
	7.3.2	Kinetik des Massenpunktes . . . . .	249
	7.3.3	Kinetik des starren Körpers . . . . .	255
	7.3.4	Kinetik des Mehrkörpersystems . . . . .	263
	7.3.5	Lagrange-Formalismus für elektromechanische Systeme . . . . .	269
7.4	<i>Schwingungstechnik</i>	. . . . .	272
	7.4.1	Freie gedämpfte Schwingungen . . . . .	272
	7.4.2	Erzwungene gedämpfte Schwingungen . . . . .	277
<b>8</b>	<b>Sensoren</b>	. . . . .	285
8.1	<i>Allgemeiner Aufbau</i>	. . . . .	285
	8.1.1	Beschreibungen . . . . .	286
	8.1.2	Anforderungen . . . . .	292
8.2	<i>Einteilung von Sensoren</i>	. . . . .	293
8.3	<i>Direkt umsetzende Sensoren</i>	. . . . .	295
	8.3.1	Aktive Sensoren . . . . .	295
	8.3.2	Passive resistive Sensoren . . . . .	301
	8.3.3	Passive kapazitive Sensoren . . . . .	307
	8.3.4	Passive induktive Sensoren . . . . .	311
8.4	<i>Indirekt umsetzende Sensoren</i>	. . . . .	312
	8.4.1	Weg, Strecke . . . . .	312
	8.4.2	Füllstand . . . . .	317
	8.4.3	Geschwindigkeit . . . . .	319
	8.4.4	Druck und Kraft . . . . .	321
	8.4.5	Beschleunigung . . . . .	323
	8.4.6	Durchfluss . . . . .	324
	8.4.7	Magnetfeld . . . . .	326
	8.4.8	Temperatur . . . . .	328
	8.4.9	Konzentration . . . . .	330
<b>9</b>	<b>Elektrische Aktoren</b>	. . . . .	332
9.1	<i>Gleichstrommaschine (GM)</i>	. . . . .	333
	9.1.1	Aufbau der Antriebsstruktur . . . . .	334
	9.1.2	Analyse der Strecke . . . . .	334

9.1.3	Berechnung des Ankerstromreglers	336
9.1.4	Berechnung des Drehzahlreglers	339
9.2	<i>Feldorientierte Steuerung einer Synchronmaschine (SM)</i>	341
9.2.1	Beschreibung der Synchronmaschine im rotorfesten Bezugssystem	343
9.2.2	Berechnung des inneren Drehmoments	344
9.2.3	Struktur der läuferflussorientierten Regelung	346
9.2.4	Berechnung der Stromregler	348
9.3	<i>Hubmagnet</i>	350
9.4	<i>Schrittmotor</i>	354
9.4.1	Vollschrittbetrieb	357
9.4.2	Halbschrittbetrieb	357
9.4.3	Start-Stopp-Rampe	358
9.4.4	Stromregelung	359
9.5	Asynchronmaschine (ASM)	362
<b>10</b>	<b>Hydraulische Aktoren</b>	369
10.1	<i>Zahnradpumpe mit Außenverzahnung</i>	370
10.2	<i>Flügelzellenpumpe</i>	371
10.3	<i>Axialkolbenpumpe</i>	371
10.4	<i>Ventil</i>	372
10.4.1	Proportionalventil	372
10.4.2	Servoventil	373
10.5	<i>Hydraulik-Zylinder und -Motor</i>	375
10.5.1	Hydraulisches Teilmodell	376
10.5.2	Vereinfachtes Modell	381
10.6	<i>Steuerung und Regelung</i>	384
10.6.1	Istwerterfassung	384
10.6.2	Steuerung	384
10.6.3	Regelung	384
10.7	<i>Auslegen eines hydraulischen Antriebes</i>	385
<b>11</b>	<b>Pneumatische Aktoren</b>	387
11.1	<i>Erzeugung und Aufbereitung der Druckluft</i>	387
11.2	<i>Wegeventil</i>	388
11.3	<i>Zylinder und Greifer</i>	389
11.3.1	Zylinder mit Kolbenstange	389
11.3.2	Kolbenstangenlose Zylinder	389
11.3.3	Greifer	391
11.4	<i>Steuerung und Regelung</i>	395
11.4.1	Analoge Wegerfassung	395
11.4.2	Digitale Wegerfassung	397
11.5	<i>Steuerung und Regelung</i>	397

---

11.6	<i>Pneumatisches Handhabungsgerät</i> . . . . .	398
11.7	<i>Auslegung eines pneumatischen Antriebs</i> . . . . .	399
<b>12</b>	<b>Informatik</b> . . . . .	401
12.1	<i>Grundlagen der Informationsverarbeitung</i> . . . . .	402
12.1.1	Daten, Zeichen, Maschinenwort . . . . .	402
12.1.2	Zahlensysteme. . . . .	404
12.1.3	Darstellung von Zeichen, Ziffern und Zahlen. . . . .	406
12.2	<i>Programmierung und Softwareentwicklung</i> . . . . .	410
12.2.1	Algorithmen und Notationen . . . . .	410
12.2.2	Variablen, Ausdrücke und Zuweisungen . . . . .	411
12.2.3	Zusammengesetzte Datentypen. . . . .	412
12.2.4	Zeigervariablen . . . . .	413
12.2.5	Datenstrukturen. . . . .	413
12.2.6	Phasen der Softwareentwicklung . . . . .	414
12.2.7	Programmiersprachen . . . . .	415
12.2.8	Programmierparadigmen. . . . .	416
12.2.9	Entwicklungswerkzeuge . . . . .	419
12.3	<i>Struktur und Organisation von Rechnern</i> . . . . .	421
12.3.1	Von-Neumann-Rechnerkonzept . . . . .	421
12.3.2	Komponenten . . . . .	422
12.3.3	Schnittstellen. . . . .	423
<b>13</b>	<b>Mikrorechentchnik</b> . . . . .	425
13.1	<i>8-bit-Mikrocontroller</i> . . . . .	431
13.1.1	Übersicht . . . . .	431
13.1.2	CPU-Architektur. . . . .	432
13.1.3	Speicherorganisation. . . . .	432
13.1.4	Anschlussstruktur der Ports . . . . .	436
13.1.5	CPU-Takt . . . . .	437
13.1.6	Zugriff auf externe Speicher. . . . .	438
13.1.7	Überblick über den Befehlssatz . . . . .	439
13.1.8	Programmbeispiele . . . . .	440
13.2	<i>16-bit-Mikrocontroller</i> . . . . .	443
13.2.1	CPU-Konzept . . . . .	444
13.2.2	Speicherorganisation. . . . .	446
13.2.3	On-Chip-Peripherie. . . . .	447
13.2.4	Interruptsystem . . . . .	450
13.2.5	Befehlsübersicht . . . . .	450
13.3	<i>32-bit-Mikrocontroller</i> . . . . .	451
13.4	<i>Auswahl und Entwicklungsrichtungen</i> . . . . .	453
<b>14</b>	<b>Mechatronische Systeme</b> . . . . .	455
14.1	Elektronischer Zündstartschalter . . . . .	455



---

14.1.1	Funktionen	455
14.1.2	Mechanische Komponenten	457
14.1.3	Hardware-Komponente	460
14.1.4	Software-Komponente	461
14.2	<i>Bedienfelder mit CAN-Elektronik</i>	468
14.3	<i>Einzelvernetzter Schalter „MAXIS“</i>	469
14.3.1	Mechanischer Aufbau	469
14.3.2	Schaltsystem	470
14.3.3	Leiterplatte und Betätiger	470
14.3.4	Stecker	471
14.3.5	Elektronik	471
14.4	<i>Piezo-Inline-Injektor</i>	472
14.5	<i>Getriebeautomatisierung am Beispiel Durashift EST</i>	473
14.5.1	Systembeschreibung	473
14.5.2	Software	476
14.5.3	Vorteile des mechatronischen Konzepts	478
14.6	<i>Antiblockiersystem (ABS)</i>	479
14.7	<i>Antriebsschlupfregelung (ASR)</i>	480
14.8	<i>Regelung der Fahrdynamik (ESP)</i>	482
14.9	<i>Kompensation mechanischer Fehler</i>	484
14.10	<i>Bewegen großer Lasten</i>	486
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>488</b>