

Ekbert Hering • Klaus Bressler • Jürgen Gutekunst

# Elektronik für Ingenieure

Unter Mitarbeit von

Horst-Herbert Austmann

Jürgen Langner

Werner Streibj

Dritte Auflage mit 754 Abbildungen



Springer

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Grundlagen der Elektrotechnik</b>	<b>.1</b>
1.1	Physikalische Größen und Einheiten	.1
1.2	Grundbegriffe	.1
1.2.1	Ladung	.1
1.2.2	Elektrischer Strom	.3
1.2.3	Elektrische Spannung	.3
1.2.4	Widerstand und Leitwert	.5
1.2.5	Elektrische Arbeit und elektrische Leistung	.6
1.2.6	Ohmsches Gesetz	.7
1.2.7	Richtungssinn	.8
1.2.8	Bildzeichen	.8
1.3	Elektrische Netze - Kirchhoff sehe Regeln	.9
1.3.1	Knotenregel (1. Kirchhoffsches Gesetz)	.9
1.3.2	Maschenregel (2. Kirchhoffsches Gesetz)	.10
1.3.3	Anwendung der Kirchhoff sehen Gesetze	.10
1.3.3.1	Reihenschaltung von Widerständen	.10
1.3.3.2	Parallelschaltung von Widerständen	.11
1.3.3.3	Meßbereichserweiterung	.13
1.3.3.4	Ausgewählte Meßanordnungen	.14
1.4	Grafische Verfahren zur Ermittlung von Strömen und Spannungen	.16
1.4.1	Reihenschaltung mit linearem Widerstand und einem Kaltleiter (PTC)	.16
1.4.2	Reihenschaltung mit linearem Widerstand und zwei nichtlinearen Bauelementen (Z-Dioden)	.17
1.4.3	Schaltungskombination aus linearem Widerstand, Kaltleiter und Heißeiter	.18
1.5	Maschen- und Knotenanalyse	.19
1.5.1	Ersatzspannungs- und Ersatzstromquelle	.20
1.5.1.1	Ersatzspannungsquelle	.20
1.5.1.2	Ersatzstromquelle	.21
1.5.1.3	Äquivalente Zweipole	.21
1.5.2	Lineare Überlagerung (Superpositionsprinzip nach HELMHOLTZ)	.21
1.5.3	Berechnung elektrischer Netzwerke	.22
1.5.3.1	Lösung linearer Gleichungssysteme	.22
1.5.3.2	Maschenstromanalyse (Kreisstromverfahren)	.25
1.5.3.3	Knotenspannungsanalyse (Knotenpotentialanalyse)	.26
1.5.3.4	Vergleich der Maschenstrom- und Knotenspannungsanalyse	.28
1.5.4	Brückenschaltungen	.28
1.5.4.1	Berechnung mit der Maschenanalyse	.28
1.5.4.2	Berechnung mit der Methode der Ersatzspannungsquelle	.29
1.6	Grundlagen der Wechselstromlehre	.30
1.6.1	Grundlagen komplexer Rechnung	.30
1.6.1.1	Reelle, imaginäre und komplexe Zahlen	.30
1.6.1.2	Rechnen mit komplexen Zahlen	.32
1.6.2	Kenngrößen	.34
1.6.2.1	Wechselspannung und Wechselstrom	.34

1.6.2.2	Effektivwert und Halbschwingungsmittelwert	35
1.6.2.3	Scheitelfaktor (Crestfaktor)	36
1.6.2.4	Formfaktor	36
1.6.3	Komplexe Rechnung im Wechselstromkreis	36
1.6.3.1	Zeigerdarstellung komplexer Größen	37
1.6.3.2	Ohmsches Gesetz	37
1.6.3.3	Verhalten der Bauelemente	39
1.6.3.4	Reihen- und Parallelschaltung	39
1.6.3.5	Äquivalente Umwandlungen	43
1.6.3.6	Zusammengesetzte Schaltungen	44
1.6.4	Nicht sinusförmige Wechselgrößen	45
1.6.5	Dämpfung und Verstärkung	46
1.6.6	Shannonsches Abtasttheorem	49
1.7	Messung elektrischer Größen	51
1.8	Grundlagen der Halbleiterphysik	51
1.8.1	Materialien	51
1.8.2	Energiebänder	55
1.8.3	Ladungsträgerkonzentration	57
1.8.3.1	Eigenleitung	57
1.8.3.2	Störstellenleitung	60
1.8.4	Beweglichkeit	62
1.8.5	Leitfähigkeit	63
1.8.6	Ausgleichsvorgänge	64
1.8.6.1	Zeitverhalten	65
1.8.6.2	Räumliche Ausbreitung einer Störung	65
1.8.7	pn-Übergang	67
1.8.7.1	Feld-und Potentialverlauf	67
1.8.7.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	69
1.9	Herstellung kompletter Schaltungen	72
1.9.1	Leiterplatten	72
1.9.2	Streifenleiter	75
1.9.3	SMT (Surface Mounted Technology)	76
1.9.4	Dickschicht-Technologie	80
1.9.5	Dünnschicht-Technologie	83
1.9.6	Hybrid-Technologie	85
1.10	Bezeichnung elektrischer Größen	86
2	<b>Passive Bauelemente</b>	87
2.1	Elektronische Bauelemente	87
2.1.1	Übersicht	87
2.1.2	Anforderungen und Anwendungsklassen	87
2.1.3	Zuverlässigkeit	88
2.1.3.1	Ursachen eines Ausfalls	89
2.1.3.2	Mittlere Ausfallrate	89
2.1.3.3	Durchschnittliche Lebensdauer	91
2.1.3.4	Herstellgrenzqualität	91
2.1.4	Normreihen	92

2.1.5	Klassifikation von diskreten Halbleiter-Bauelementen. . . . .	92
2.1.6	Datenblätter. . . . .	94
2.2	Widerstände. . . . .	94
2.2.1	Übersicht über die Widerstände. . . . .	95
2.2.2	Lineare Festwiderstände. . . . .	95
2.2.2.1	Drahtwiderstände. . . . .	99
2.2.2.2	Schichtwiderstände. . . . .	100
2.2.2.3	Metallglasurwiderstände. . . . .	100
2.2.3	Nichtlineare Widerstände. . . . .	100
2.2.3.1	Heißeiter (NTC-Widerstände). . . . .	101
2.2.3.2	Silicium-Widerstände. . . . .	103
2.2.3.3	Kaltleiter (PTC-Widerstände). . . . .	104
2.2.3.4	Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren, VDR). . . . .	104
2.2.3.5	Magnetfeldabhängige Widerstände (Feldplatten). . . . .	106
2.2.4	Einstellbare Widerstände (Potentiometer). . . . .	107
2.3	Kondensatoren . . . . .	108
2.3.1	Übersicht über die Kondensatoren. . . . .	109
2.3.2	Kondensatoren mit dünnen Folien als Dielektrikum. . . . .	113
2.3.2.1	Aufbau. . . . .	113
2.3.2.2	Eigenschaften. . . . .	113
2.3.2.3	Selbstheilende Kondensatoren (MP und MK). . . . .	116
2.3.2.4	Kondensatoren für die Leistungselektronik. . . . .	116
2.3.3	Elektrolyt-Kondensatoren. . . . .	118
2.3.4	Keramik-Kondensatoren. . . . .	121
2.3.4.1	Werkstoffe und Einteilung. . . . .	121
2.3.4.2	Eigenschaften. . . . .	121
2.3.4.3	Bauformen. . . . .	121
2.3.5	Einstellbare Kondensatoren. . . . .	124
2.4.	Induktivitäten . . . . .	125
2.4.1	Kerneigenschaften. . . . .	127
2.4.1.1	Luftpulen. . . . .	127
2.4.1.2	Induktivitäten mit Kern. . . . .	127
2.4.1.3	Kernformen. . . . .	127
2.4.1.4	Ersatzschaltbilder. . . . .	127
2.4.1.5	Hysteresekurve. . . . .	128
2.4.1.6	Ferrimagnetisches Material. . . . .	129
2.4.1.7	Ferromagnetika. . . . .	130
2.4.2	Wicklungseigenschaften. . . . .	131
2.4.2.1	Zylinderwicklung (Solenoid). . . . .	131
2.4.2.2	Wicklungskapazität. . . . .	132
2.4.2.3	Scheibenwicklung. . . . .	132
2.4.2.4	Ringkernspule (Toroid). . . . .	133
2.4.2.5	Induktivität einer Zylinderspule. . . . .	133
2.5	Dioden. . . . .	134
2.5.1	Schaltdioden. . . . .	135
2.5.2	Schottky-Dioden. . . . .	138
2.5.3	Gleichrichterioden. . . . .	139
2.5.3.1	Netzgleichrichter. . . . .	141
2.5.3.2	Schnelle Gleichrichterioden. . . . .	143

2.5.4	Schottky-Leistungsdioden. . . . .	.144
2.5.5	Z-Dioden. . . . .	.145
2.5.6	Diac-Triggerdioden. . . . .	.146
2.5.7	Fotodioden. . . . .	.147
2.5.8	Kapazitätsdioden. . . . .	.149
2.5.9	pin-Dioden. . . . .	.150
2.5.10	Step-Recovery-Dioden. . . . .	.153
2.5.11	Tunneldioden. . . . .	.154
2.5.12	Backwarddioden. . . . .	.155
<b>3</b>	<b>Aktive Bauelemente. . . . .</b>	<b>.156</b>
3.1.	Transistoren. . . . .	.156
3.1.1	Arten von Transistoren und deren Aufbau. . . . .	.156
3.1.2	Beschattung und Funktion des Transistors. . . . .	.158
3.1.3	Wichtige Kennwerte von Transistoren. . . . .	.159
3.1.3.1	Eingangswiderstand. . . . .	.159
3.1.3.2	Stromverstärkung. . . . .	.160
3.1.3.3	Ausgangsleitwert. . . . .	.162
3.1.3.4	Spannungsrückwirkung. . . . .	.162
3.1.3.5	$\beta$ -Parameter als Transistorkennwerte. . . . .	.163
3.1.3.6	Rauschen. . . . .	.163
3.1.4	Weitere Kennwerte. . . . .	.165
3.1.4.1	Restströme. . . . .	.165
3.1.4.2	Sperrschichtkapazitäten. . . . .	.165
3.1.4.3	Transitfrequenz. . . . .	.166
3.1.4.4	Schaltzeiten. . . . .	.166
3.1.5	Transistor-Grenzwerte. . . . .	.166
3.1.5.1	Sperrspannungen. . . . .	.166
3.1.5.2	Ströme. . . . .	.166
3.1.5.3	Temperaturen. . . . .	.167
3.1.5.4	Verlustleistung. . . . .	.167
3.1.5.5	Erlaubter Arbeitsbereich. . . . .	.167
3.1.6	Typenschlüssel für Halbleiter. . . . .	.168
3.1.7	Transistordatenblatt. . . . .	.168
3.2	Analoge Grundsaltungen mit bipolaren Transistoren. . . . .	.173
3.2.1	Emitterschaltung. . . . .	.173
3.2.1.1	Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung. . . . .	.175
3.2.1.2	Einstellung des Arbeitspunktes. . . . .	.177
3.2.1.3	Praktische Dimensionierung der Emitterschaltung. . . . .	.178
3.2.1.4	Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung. . . . .	.180
3.2.1.5	Emitterschaltung bei höheren Frequenzen. . . . .	.180
3.2.2	Kollektorschaltung. . . . .	.181
3.2.2.1	Bootstrapschaltung. . . . .	.182
3.2.3	Basisschaltung. . . . .	.183
3.2.4	Stromquelle. . . . .	.185
3.2.5	Differenzverstärker. . . . .	.185
3.2.5.1	Gleichtaktverstärkung. . . . .	.187
3.2.5.2	Gleichtaktunterdrückung. . . . .	.187
3.2.5.3	Korrektur der Offsetspannung. . . . .	.188
3.2.5.4	Gegenkopplung im Differenzverstärker. . . . .	.189

3.2.6	Darlingtonschaltung . . . . .	189
3.2.7	Verstärker für höhere Frequenzen. . . . .	191
3.2.7.1	Grenzen der Verstärkung (Verstärkungs-Bandbreite-Produkt). . . . .	191
3.2.8	Kaskodeschaltung . . . . .	192
3.3	Feldeffekttransistoren. . . . .	194
3.3.1	Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (JFET). . . . .	194
3.3.1.1	Kennlinien und Arbeitsbereiche des Feldeffekttransistors. . . . .	195
3.3.1.2	Ohmscher Bereich. . . . .	195
3.3.1.3	Triodenbereich. . . . .	196
3.3.1.4	Abschnürbereich. . . . .	196
3.3.1.5	Durchbruchbereich. . . . .	196
3.3.2	MOS-Feldeffekttransistoren. . . . .	196
3.3.2.1	Eingangswiderstand . . . . .	197
3.3.2.2	Steilheit . . . . .	198
3.3.2.3	Ausgangsleitwert . . . . .	198
3.3.2.4	Spannungsrückwirkung . . . . .	199
3.3.3	Weitere Kennwerte der Feldeffekttransistoren. . . . .	199
3.3.3.1	F-Parameter als Kennwerte des Feldeffekttransistors. . . . .	199
3.3.3.2	Rauschen. . . . .	199
3.3.3.3	Restströme. . . . .	200
3.3.3.4	Temperaturverhalten. . . . .	200
3.3.3.5	Grenzfrequenz . . . . .	200
3.3.3.6	Schaltzeiten. . . . .	201
3.3.4	Grenzwerte der Feldeffekttransistoren. . . . .	201
3.3.4.1	Ströme. . . . .	201
3.3.4.2	Sperrspannungen. . . . .	201
3.3.4.3	Temperaturen. . . . .	201
3.3.4.4	Verlustleistung und erlaubter Arbeitsbereich. . . . .	201
3.4	Schaltungstechnik mit Feldeffekttransistoren. . . . .	202
3.4.1	Übergang vom bipolaren Transistor zum Feldeffekttransistor. . . . .	202
3.4.2	Grundschaltungen der Feldeffekttransistoren. . . . .	202
3.4.3	Stabilisierung des Arbeitspunktes und der Verstärkung durch Gegenkopplung . . . . .	203
3.4.4	Wirkung der Gegenkopplung . . . . .	204
3.4.5	Differenzverstärker mit Feldeffekttransistoren. . . . .	205
3.4.6	Steuerbare Spannungsteiler mit Feldeffekttransistoren. . . . .	205
3.4.7	Feldeffekttransistoren als Schalter für analoge Signale. . . . .	206
3.4.8	Dual-Gate-MOSFET (Doppelgate-MOSFET). . . . .	206
3.4.9	MOSFET-Leistungstransistoren für Schalter. . . . .	207
3.4.10	MOSFET-Leistungstransistoren für analoge Verstärker. . . . .	210
3.5	Lineare und nichtlineare Verstärker. . . . .	212
3.5.1	Wichtige Eigenschaften linearer Verstärker. . . . .	212
3.5.2	Herleitung der Oberschwingungen und der Mischprodukte. . . . .	212
3.5.3	Meßverfahren zur Beurteilung von Verstärkern. . . . .	213
3.5.4	Nichtlineare Verstärker. . . . .	213
3.5.5	Aufbau linearer Verstärker in der Praxis. . . . .	213
3.5.6	Schaltungstechnische Besonderheiten gegengekoppelter Verstärker . . . . .	215
3.5.7	Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Halbleitern. . . . .	216

## XII Inhalt

<b>4</b>	<b>Hochfrequenz (HF)-Verstärker</b>	218
4.1	Anpassung und Reflexion	218
4.2	Transport der Hochfrequenz auf Leitungen	219
4.3	Wellenwiderstand einer Hochfrequenzleitung	220
4.4	Eingangs- und Ausgangswiderstände von HF-Transistoren	221
4.4.1	S-Parameter	222
4.4.2	Definition der S-Parameter	222
4.4.3	Messung der S-Parameter	223
4.5	Rauschparameter	224
4.5.1	Rauschfaktor	225
4.5.2	Rauschen bei mehrstufigen Verstärkern	225
4.6	Darstellung komplexer Größen	226
4.7	Anwendung des Smith-Diagramms	228
<b>5</b>	<b>Bauelemente der Leistungselektronik</b>	232
5.1	Thyristor	232
5.1.1	Statische Kennlinien	232
5.1.2	Dynamische Kennlinien	235
5.1.3	Schutzbeschaltung	235
5.1.4	Kühlung	236
5.1.5	Spannungssteuerung mit Thyristoren	237
5.2	Triac	238
5.3	Abschaltthyristor (GTO)	238
5.4	Insulated-Gate-Bipolar-Transistor (IGBT)	239
<b>6</b>	<b>Optoelektronik</b>	240
6.1	Einleitung	240
6.2	Radiometrische und fotometrische Größen	241
6.2.1	Radiometrische Größen	241
6.2.2	Fotometrische Größen	242
6.3	Halbleiter-Sender	244
6.3.1	Strahlungsemission aus Halbleitern	244
6.3.2	Lumineszenzdioden	245
6.3.3	Halbleiterlaser	253
6.4	Displays	259
6.4.1	Anthropotechnische Gesichtspunkte	259
6.4.2	Displaytypen	260

6.4.3	Analoganzeigen. . . . .	262
6.4.4	Numerische Anzeigen. . . . .	263
6.4.5	Alphanumerische Anzeigen. . . . .	265
6.5	Halbleiter-Detektoren. . . . .	266
6.5.1	Strahlungsabsorption in Halbleitern. . . . .	266
6.5.2	Gütekriterien von Detektoren. . . . .	267
6.5.3	Fotowiderstand. . . . .	268
6.5.4	Fotodiode. . . . .	271
6.5.5	Solarzelle. . . . .	279
6.5.6	Fototransistor. . . . .	284
6.5.7	Fotothyristor. . . . .	286
6.5.8	Bildsensoren. . . . .	286
6.6	Optokoppler. . . . .	290
6.7	Lichtwellenleiter. . . . .	293
<b>7</b>	<b>Sensoren</b> . . . . .	<b>298</b>
7.1	Grundlagen. . . . .	298
7.1.1	Definition und Einteilung. . . . .	298
7.1.2	Wirtschaftliche und technische Bedeutung . . . . .	298
7.2	Sensoren für die wichtigsten Meßgrößen. . . . .	304
7.2.1	Weg- und Positions-Sensoren. . . . .	304
7.2.2	Kraft- und Druck-Sensoren. . . . .	308
7.2.3	Temperatur-Sensoren. . . . .	308
7.3	Werkstoffe und Technologien. . . . .	312
7.3.1	Siliciumtechnik. . . . .	312
7.3.1.1	Vorteile von Silicium. . . . .	312
7.3.1.2	Physikalische Effekte. . . . .	312
7.3.2	Dünnschichttechnik. . . . .	314
7.3.2.1	Verfahren. . . . .	314
7.3.2.2	Anwendungen. . . . .	314
7.3.3	Dickschichttechnik. . . . .	315
7.3.4	Faseroptische Sensoren. . . . .	316
7.3.4.1	Modulation der Lichtintensität . . . . .	316
7.3.4.2	Modulation der Wellenlänge. . . . .	316
7.3.4.3	Modulation der Polarisierung. . . . .	316
7.3.5	Chemische Sensoren. . . . .	317
7.3.5.1	Elektrochemische Sensoren. . . . .	317
7.3.5.2	Chemische Feldeffekttransistoren. . . . .	317
7.3.5.3	Optochemische Sensoren (Optoden). . . . .	318
7.4	Bevorzugte Einsatzgebiete. . . . .	319
<b>8</b>	<b>Analoge integrierte Schaltungen</b> . . . . .	<b>320</b>
8.1	Herstellung und Technologie. . . . .	320



8.2	Operationsverstärker. . . . .	324
8.2.1	Idealer und realer Operationsverstärker. . . . .	325
8.2.2	Schaltungstechnischer Aufbau. . . . .	325
8.2.2.1	Eingangsstufe als Differenzverstärker. . . . .	328
8.2.2.2	Zweite Stufe als Spannungsverstärker. . . . .	329
8.2.2.3	Endstufe als Stromverstärker. . . . .	330
8.2.3	Beispiel eines Standard Verstärkers. . . . .	331
8.2.4	Operationsverstärker für höhere Anforderungen. . . . .	333
8.2.5	Stabilitätsbetrachtung. . . . .	334
8.3	Operationsverstärker mit statischer Beschaltung. . . . .	337
8.3.1	Invertierender Spannungsverstärker. . . . .	340
8.3.2	Nicht invertierender Spannungsverstärker. . . . .	341
8.3.3	Subtrahierverstärker. . . . .	342
8.3.4	Schmitt-Trigger. . . . .	344
8.3.5	Nichtlinearer Verstärker. . . . .	345
8.3.6	Addierender Verstärker, invertierend. . . . .	347
8.3.7	Addierender Verstärker, nicht invertierend. . . . .	347
8.3.8	Konstantstromquellen. . . . .	348
8.3.9	Idealer Einweggleichrichter. . . . .	349
8.3.10	Zweiweggleichrichter ohne gemeinsames Potential. . . . .	349
8.3.11	Zweiweggleichrichter mit gemeinsamem Potential. . . . .	350
8.3.12	Spitzenwertgleichrichter. . . . .	351
8.3.13	Logarithmierschaltung. . . . .	351
8.3.14	Delogarithmierschaltung (Exponential Verstärker). . . . .	353
8.4	Operationsverstärker mit dynamischer Beschaltung. . . . .	354
8.4.1	Integrator. . . . .	356
8.4.2	Differenzierer. . . . .	358
8.4.3	Filterschaltungen. . . . .	360
8.4.3.1	Tiefpaß 1. Ordnung. . . . .	360
8.4.3.2	Tiefpaß 2. Ordnung. . . . .	361
8.4.3.3	Hochpaß 1. Ordnung. . . . .	364
8.4.3.4	Hochpaß 2. Ordnung. . . . .	365
8.4.3.5	Bandpaß (selektives Filter). . . . .	365
8.4.3.6	Bandsperre. . . . .	368
8.4.3.7	Filter höherer Ordnung. . . . .	369
8.5	Weitere wichtige integrierte Analogschaltungen. . . . .	369
8.5.1	Komparatoren. . . . .	369
8.5.2	Spannungsregler. . . . .	370
8.5.3	Bandgap-Referenzelement. . . . .	371
9	<b>Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandler. . . . .</b>	<b>375</b>
9.1	Digital-Analog-Wandler (DA-Wandler). . . . .	375
9.1.1	R-2R-Leiternetzwerk. . . . .	375
9.1.2	Multiplizierender DA-Wandler. . . . .	376
9.1.3	Vier-Quadranten multiplizierender DA-Wandler. . . . .	378
9.1.4	DA-Wandler mit fester Referenzspannung. . . . .	379
9.1.5	Datenwandler mit mikroprozessorkompatibler Schnittstelle. . . . .	379
9.1.6	Unerwünschte Spitzen beim Weiterzählen des digitalen Eingangswertes. . . . .	380
9.1.7	Fehler bei der Datenumsetzung. . . . .	381

9.2	Analog-Digital-Wandler . . . . .	383
9.2.1	Integrierende Analog-Digital-Wandler . . . . .	383
9.2.2	Analog-Digital-Wandler nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation . . . . .	386
9.2.3	Abtast- und Halteschaltung (Sample and Hold). . . . .	388
9.2.4	Parallel-Analog-Digital-Wandler. . . . .	389
9.2.5	Analog-Digital-Wandler nach dem Delta-Sigma-Verfahren. . . . .	392
<b>10</b>	<b>Analoge Regelungstechnik . . . . .</b>	<b>393</b>
10.1	Steuerung und Regelung . . . . .	393
10.2	Beispiel einer elektronischen Regelung . . . . .	393
10.3	Beispiel einer elektronisch-mechanischen Regelung . . . . .	394
10.4	Grundsätzliche Betrachtung einer Regelung . . . . .	395
10.5	Elemente des Regelkreises und ihre Eigenschaften. . . . .	395
10.6	Vorgehen beim Entwurf einer stabilen Regelung . . . . .	398
10.6.1	Aufbau . . . . .	398
10.6.2	Stabilitätsbedingung . . . . .	398
10.6.3	Beurteilung eines Regelkreises mit dem Bode-Diagramm. . . . .	399
10.6.4	Einschwingverhalten. . . . .	401
10.6.5	Verbleibende Abweichung . . . . .	402
10.7	Zusammenfassung . . . . .	403
<b>11</b>	<b>Grundlagen der digitalen Schaltungstechnik . . . . .</b>	<b>404</b>
11.1	Zahlensysteme. . . . .	404
11.1.1	Duales Zahlensystem. . . . .	405
11.1.2	Hexadezimalen Zahlensystem . . . . .	406
11.1.3	BCD-Zahlensystem. . . . .	409
11.1.4	Erweiterungen des binären Zahlensystems. . . . .	410
11.1.4.1	Negative Zahlen. . . . .	410
11.1.4.2	Festkomma- und Gleitkommazahlen. . . . .	411
11.2	Kodes. . . . .	415
11.2.1	Gray-Kode. . . . .	415
11.2.2	Fernschreibe-Kode. . . . .	417
11.2.3	ASCII-Kode. . . . .	418
11.2.4	Redundante Kodes. . . . .	421
11.2.5	Fehlererkennende Kodes. . . . .	421
11.2.6	Fehlerkorrigierende Kodes. . . . .	422
11.3	Grundlagen der Booleschen Algebra . . . . .	426
11.3.1	Binäre Verknüpfungen. . . . .	426
11.3.2	Gesetze von Boole und De Morgan. . . . .	429
11.3.2.1	Gesetze der Schaltalgebra . . . . .	429

11.3.2.2	Gesetze von De Morgan	429
11.3.3	Entwicklung einer Schaltung mit Hilfe der Booleschen Algebra	432
11.4	Minimierung nach Karnaugh-Veitch	434
11.4.1	Grundlagen	434
11.4.2	Karnaugh-Veitch-Diagramm für drei Eingangsvariable	436
11.4.3	Karnaugh-Veitch-Diagramm für vier Eingangsvariable	437
11.4.4	Karnaugh-Veitch-Diagramm für fünf Eingangsvariable	439
11.4.5	Karnaugh-Veitch-Diagramm für sechs und mehr Eingangsvariable	440
11.4.6	Beispiele zur Karnaugh-Veitch-Minimierung	442
12	<b>Digitale Bauelemente</b>	446
12.1	Logikfamilien	447
12.1.1	TTL	450
12.1.2	FAST	454
12.1.3	CMOS	455
12.1.4	High-Speed-CMOS	458
12.1.5	ECL	461
12.1.6	Schaltzeichen und Gehäuseformen	463
12.2	Speicherbauteile und Speicheraufbau	470
12.2.1	Flüchtige Speicher	471
12.2.2	Nicht flüchtige Speicher	473
12.2.3	Sonderformen von Speicherbauteilen	475
12.2.4	Aufbau großer Speichersysteme	476
12.3	Mikrorechner	478
12.3.1	Mikroprozessoren	479
12.3.2	Single-Chip-Mikrocomputer	480
12.3.3	RISC-Computer	482
12.3.4	Transputer	483
13	<b>Entwicklung digitaler Schaltungen</b>	486
13.1	Entwicklungsphasen	486
13.2	Pulsfahrplan	490
13.3	Leitungen für digitale Signale	493
13.3.1	Bandbegrenzung digitaler Signale	494
13.3.2	Reflexionen	495
13.3.2.1	Abgeschlossene Leitung	495
13.3.2.2	Offene Leitung	503
13.4	Störfreier Entwurf digitaler Schaltungen (Glitch-Free-Design)	506
13.5	Phase Locked Loop	509
13.5.1	Grundlagen	509
13.5.2	Digitaler PLL	511
13.5.3	Tiefpaß 1. Ordnung	517

<b>14</b>	<b>ASIC</b>	<b>521</b>
14.1	Übersicht	522
14.1.1	Digitale ASIC-Familien	522
14.1.2	Analoge ASIC	524
14.2	Programmierbare logische Bauteile (PLD)	527
14.2.1	Aufbau des PAL (Programmable Array Logic)	527
14.2.1.1	Eingangsschaltung des PAL	528
14.2.1.2	Verknüpfungen im AND-Array	529
14.2.1.3	Verknüpfungen im OR-Array	530
14.2.1.4	Ausgangsschaltungen	530
14.2.2	Realisierung einer Schaltung	531
14.2.3	Testen von PLD-Bauteilen	539
14.3	Digitale Gate-Arrays	540
14.3.1	Kanal-Gate-Array	540
14.3.2	Kanallose Gate-Arrays (Sea of Gates)	541
14.3.3	Programmierbare Gate-Arrays	543
14.3.3.1	Logic Cell Array (LCA)	543
14.3.3.2	Field Programmable Gate-Array (FPGA)	544
14.4	Standard-Zellen-ASIC	547
14.4.1	Aufbau der Standard-Zellen-ASIC	548
14.4.2	Elektronenstrahl-Direkt-Schreibverfahren	549
14.4.3	Standardisierte Kundenschaltschaltungen (Application Specific Standard Products, ASSP)	550
<b>15</b>	<b>Speicherprogrammierbare Steuerungen</b>	<b>552</b>
15.1	Einführung	552
15.2	Aufbau und Wirkungsweise	553
15.3	Programmierung speicherprogrammierbarer Steuerungen	555
15.3.1	Befehlsvorrat einer SPS	555
15.3.2	Arten der Programmdarstellung	555
15.4	Programmierung einfacher Steuerungsfunktionen	557
15.4.1	Steuerungen mit Verknüpfungsfunktionen	557
15.4.1.1	ODER-Funktion, UND-Funktion und Negation	557
15.4.1.2	Disjunktive und konjunktive Schaltfunktionen	558
15.4.2	Speicherfunktion	560
15.4.3	Auswertung von Signalfanken	560
15.4.4	Zeitgeberfunktion	561
15.4.5	Zähler	562
15.4.6	Realisierung von Ablaufsteuerungen	563
15.5	Programmierung mit Software-Bausteinen	565
15.6	Programmiereinrichtungen	566

<b>16</b>	<b>Schnittstellen, Bussysteme und Netze</b>	<b>568</b>
16.1	Einführung	568
16.2	Grundbegriffe der Datenübertragung	568
16.2.1	Arten der Verbindung, des Betriebs und der Übertragung	569
16.2.2	Datenformate und Steuerzeichen bei serieller Übertragung	570
16.2.3	Übertragungssteuerung (Handshake)	571
16.3	Schnittstellen	571
16.3.1	Centronics-Schnittstelle	571
16.3.2	IEC-Bus	573
16.3.3	V.24-Schnittstelle	575
16.3.3.1	Mechanische Eigenschaften	575
16.3.3.2	Funktionale Eigenschaften	575
16.3.3.3	Elektrische Eigenschaften	576
16.3.3.4	Verbindungen und Fehlersuche	576
16.3.3.5	Anschlußmöglichkeiten	577
16.3.3.6	Funktionsüberprüfung	579
16.3.3.7	V.24-Schnittstelle in der Datenfernübertragung	579
16.4	Bussysteme	581
16.4.1	Parallele Bussysteme	581
16.4.2	Serielle Bussysteme	582
16.5	Netze	584
16.5.1	Einführung	584
16.5.2	Global Area Networks (GAN)	584
16.5.3	Wide Area Networks (WAN)	585
16.5.4	Lokale Netze (LAN)	586
16.5.5	OSI-Modell mit sieben Schichten	587
16.5.5.1	Beschreibung	587
16.5.5.2	Schichten des OSI-Modells	589
16.5.6	SNA-Modell (System Network Architecture)	592
16.5.7	DNA-Modell (Digital Network Architecture)	593
16.5.8	Zugriffsverfahren bei Netzen	594
16.5.8.1	Kollisionsbehaftete Verfahren	594
16.5.8.2	Kollisionsfreie Verfahren	596
16.5.9	MAP- und TOP-Standards	600
16.5.9.1	MAP-Standard (Bitbus zur Fertigungssteuerung)	600
16.5.9.2	TOP-Standard	602
16.5.10	ISDN	603
16.5.10.1	ISDN-Konzept	603
16.5.10.2	ISDN-Konzept im OSI-Modell	604
16.5.10.3	ISDN-Dienste mit Bitraten bis zu 64 kBit/s	605
16.5.10.4	Kommunikation mit privaten Netzen (LAN)	605
16.5.11	Kopplung von Netzen	606
16.5.12	Planung von lokalen Netzen	608
16.5.12.1	Allgemeine Anforderungen	608
16.5.12.2	Einführung eines hierarchischen Kommunikationskonzeptes	608
16.5.12.3	Einsatz von Lichtwellenleitern	609
16.5.12.4	Vorgehensweise bei der Planung von Netzen	610

<b>17</b>	<b>Stromversorgung</b>	. . . . .	<b>.611</b>
17.1	Arten der Spannungsquellen (Energiequellen)	. . . . .	.612
17.2	Verschiedene Ausführungen der Stromversorgung	. . . . .	.613
17.2.1	Potentialtrennung	. . . . .	.613
17.2.2	Transformator	. . . . .	.613
17.2.3	Transformator-Netzteil	. . . . .	.617
17.2.4	Gleichrichter-Schaltungen	. . . . .	.617
17.2.5	Lineare Regler	. . . . .	.620
17.3	Getaktete Stromversorgungen	. . . . .	.625
17.3.1	Pulsbreitenmodulation	. . . . .	.625
17.3.2	Durchflußwandler	. . . . .	.626
17.3.2.1	Tiefsetzsteller	. . . . .	.626
17.3.2.2	Eintakt-Flußwandler mit Transformator	. . . . .	.628
17.3.2.3	Flußwandler-Varianten	. . . . .	.630
17.3.2.4	Transduktor (Sättigungs-drossel)	. . . . .	.632
17.3.3	Sperrwandler	. . . . .	.632
17.3.3.1	Hoch- und Tiefsetzsteller	. . . . .	.633
17.3.3.2	Sperrwandler mit Transformator	. . . . .	.633
17.3.3.3	Hochsetzsteller	. . . . .	.633
17.3.4	Resonanzwandler	. . . . .	.634
17.3.5	Eingangsfiler	. . . . .	.635
17.4	Regelungstechnik	. . . . .	.636
17.4.1	Fühlerleitungen	. . . . .	.636
17.4.2	Regelung eines Flußwandlers	. . . . .	.637
17.5	Wirkungsgrad	. . . . .	.638
17.5.1	Entwärmung (Wärmeübertragung)	. . . . .	.638
17.6	Gesetzliche Vorschriften und Normen	. . . . .	.639
17.6.1	Produkthaftung	. . . . .	.639
17.6.2	Sicherheit	. . . . .	.640
17.6.2.1	Elektrische Sicherheit	. . . . .	.640
17.6.2.2	Brandschutz	. . . . .	.642
17.6.3	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	. . . . .	.642
17.6.4	Netzurückwirkungen; Netzüberschwingungen	. . . . .	.644
<b>18</b>	<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b>	. . . . .	<b>.645</b>
<b>19</b>	<b>Weiterführendes Schrifttum</b>	. . . . .	<b>.658</b>
<b>20</b>	<b>Sachwortverzeichnis</b>	. . . . .	<b>.661</b>