

---

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XXV
<b>1 Grundlagen der Elektrotechnik . . . . .</b>	<b>1</b>
E. Hering und R. Martin	
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 . . . . .	4
1.2.4 Widerstand und Leitwert . . . . .	5
1.2.5 Elektrische Arbeit und elektrische Leistung . . . . .	6
1.2.6 Ohm'sches Gesetz . . . . .	8
1.2.7 Richtungssinn . . . . .	9
1.2.8 Bildzeichen . . . . .	9
1.3 Elektrische Netze – Kirchhoff'sche Regeln . . . . .	9
1.3.1 Knotenregel (1. Kirchhoff'sches Gesetz) . . . . .	9
1.3.2 Maschenregel (2. Kirchhoff'sches Gesetz) . . . . .	11
1.3.3 Anwendung der Kirchhoff'schen Gesetze . . . . .	12
1.3.3.1 Reihenschaltung von Widerständen . . . . .	12
1.3.3.2 Parallelschaltung von Widerständen . . . . .	12
1.3.3.3 Messbereichserweiterung . . . . .	15
1.3.3.4 Ausgewählte Messanordnungen . . . . .	16
1.4 Grafische Verfahren zur Ermittlung von Strömen und Spannungen . . . . .	18
1.4.1 Reihenschaltung mit linearem Widerstand und einem Kaltleiter (PTC) . . . . .	18
1.4.2 Reihenschaltung mit linearem Widerstand und zwei nichtlinearen Bauelementen (Z-Dioden) . . . . .	19
1.4.3 Schaltungskombination aus linearem Widerstand, Kaltleiter und Heißeiter . . . . .	20
1.5 Maschen- und Knotenanalyse . . . . .	22
1.5.1 Ersatzspannungs- und Ersatzstromquelle . . . . .	22
1.5.1.1 Ersatzspannungsquelle . . . . .	22
1.5.1.2 Ersatzstromquelle . . . . .	23
1.5.1.3 Äquivalente Zweipole . . . . .	24
1.5.2 Lineare Überlagerung (Superpositionsprinzip nach HELMHOLTZ) . . . . .	24

1.5.3	Berechnung elektrischer Netzwerke . . . . .	25
1.5.3.1	Lösung linearer Gleichungssysteme . . . . .	26
1.5.3.2	Maschenstromanalyse (Kreisstromverfahren) . . . . .	28
1.5.3.3	Knotenspannungsanalyse (Knotenpotenzialanalyse) . . . . .	29
1.5.3.4	Vergleich der Maschenstrom- und Knotenspannungsanalyse . . . . .	31
1.5.4	Brückenschaltungen . . . . .	32
1.5.4.1	Berechnung mit der Maschenanalyse . . . . .	32
1.5.4.2	Berechnung mit der Methode der Ersatzspannungsquelle . . . . .	32
1.6	Grundlagen der Wechselstromlehre . . . . .	34
1.6.1	Grundlagen komplexer Rechnung . . . . .	34
1.6.1.1	Reelle, imaginäre und komplexe Zahlen . . . . .	34
1.6.1.2	Rechnen mit komplexen Zahlen . . . . .	35
1.6.2	Kenngrößen . . . . .	39
1.6.2.1	Wechselspannung und Wechselstrom . . . . .	39
1.6.2.2	Effektivwert und Halbschwingungsmittelwert . . . . .	39
1.6.2.3	Scheitelfaktor (Crestfaktor) . . . . .	41
1.6.2.4	Formfaktor . . . . .	41
1.6.3	Komplexe Rechnung im Wechselstromkreis . . . . .	41
1.6.3.1	Zeigerdarstellung komplexer Größen . . . . .	41
1.6.3.2	Ohm'sches Gesetz . . . . .	42
1.6.3.3	Verhalten der Bauelemente . . . . .	44
1.6.3.4	Reihen- und Parallelschaltung . . . . .	46
1.6.3.5	Äquivalente Umwandlungen . . . . .	49
1.6.3.6	Zusammengesetzte Schaltungen . . . . .	50
1.6.4	Nicht sinusförmige Wechselgrößen . . . . .	51
1.6.5	Dämpfung und Verstärkung . . . . .	54
1.6.6	Shannon'sches Abtasttheorem . . . . .	56
1.6.7	Übung . . . . .	58
1.7	Bezeichnung und Messung elektrischer Größen . . . . .	58
1.7.1	Bezeichnung elektrischer Größen . . . . .	58
1.7.2	Messung elektrischer Größen . . . . .	59
1.8	Grundlagen der Halbleiterphysik . . . . .	62
1.8.1	Materialien . . . . .	62
1.8.2	Energiebänder . . . . .	63
1.8.3	Ladungsträgerkonzentration . . . . .	64
1.8.3.1	Eigenleitung . . . . .	64
1.8.3.2	Störstellenleitung . . . . .	67
1.8.4	Beweglichkeit . . . . .	70
1.8.5	Leitfähigkeit . . . . .	71
1.8.6	Ausgleichsvorgänge . . . . .	72
1.8.6.1	Zeitverhalten . . . . .	72
1.8.6.2	Räumliche Ausbreitung einer Störung . . . . .	73
1.8.7	pn-Übergang . . . . .	75

	1.8.7.1	Feld- und Potenzialverlauf . . . . .	75
	1.8.7.2	Strom-Spannungs-Kennlinie . . . . .	76
	1.8.7.3	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter . . . . .	80
	1.8.8	Zur Übung . . . . .	80
1.9		Herstellung kompletter Schaltungen . . . . .	82
	1.9.1	Leiterplatten . . . . .	82
	1.9.2	Streifenleiter . . . . .	86
	1.9.3	SMT (Surface Mounted Technology) . . . . .	86
	1.9.4	Dickschicht-Technologie . . . . .	88
	1.9.5	Dünnschicht-Technologie . . . . .	88
	1.9.6	Trägermaterial mit eingebetteten Bauteilen . . . . .	89
1.10		Weiterführende Literatur . . . . .	89
<b>2</b>		<b>Passive Bauelemente . . . . .</b>	<b>91</b>
		<b>E. Hering und K. Bressler</b>	
	2.1	Elektronische Bauelemente . . . . .	91
	2.1.1	Übersicht . . . . .	91
	2.1.2	Anforderungen und Anwendungsklassen . . . . .	91
	2.1.3	Zuverlässigkeit . . . . .	92
	2.1.3.1	Ursachen eines Ausfalls . . . . .	93
	2.1.3.2	Mittlere Ausfallrate . . . . .	94
	2.1.3.3	Durchschnittliche Lebensdauer . . . . .	95
	2.1.3.4	Herstellgrenzqualität . . . . .	96
	2.1.4	Normreihen . . . . .	97
	2.1.5	Klassifikation von diskreten Halbleiter-Bauelementen	98
	2.1.6	Datenblätter . . . . .	98
	2.2	Widerstände . . . . .	99
	2.2.1	Übersicht über die Widerstände . . . . .	99
	2.2.2	Lineare Festwiderstände . . . . .	100
	2.2.2.1	Farbcodierung . . . . .	100
	2.2.2.2	Belastbarkeit bei Dauerbetrieb . . . . .	101
	2.2.2.3	Impulsbelastbarkeit . . . . .	102
	2.2.2.4	Maximale Dauerspannung $U_{\max}$ . . . . .	102
	2.2.2.5	Kritischer Widerstandswert $R_{\text{krit}}$ . . . . .	102
	2.2.2.6	Temperaturabhängigkeit . . . . .	103
	2.2.2.7	Stabilität . . . . .	103
	2.2.2.8	Thermisches Rauschen . . . . .	103
	2.2.2.9	Nichtlinearität . . . . .	104
	2.2.2.10	Hochfrequenzverhalten . . . . .	104
	2.2.2.11	Drahtwiderstände . . . . .	104
	2.2.2.12	Schichtwiderstände . . . . .	105
	2.2.2.13	Metallglasurwiderstände . . . . .	105
	2.2.3	Nichtlineare Widerstände . . . . .	106
	2.2.3.1	Heißeiter (NTC-Widerstände) . . . . .	106
	2.2.3.2	Silicium-Widerstände . . . . .	108
	2.2.3.3	Kaltleiter (PTC-Widerstände) . . . . .	109

2.2.3.4	Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren, VDR) . . . . .	110
2.2.3.5	Magnetfeldabhängige Widerstände (Feldplatten) . . . . .	112
2.2.4	Einstellbare Widerstände (Potenziometer und Trimmer) . . . . .	113
2.2.5	Zur Übung . . . . .	114
2.3	Kondensatoren . . . . .	114
2.3.1	Übersicht über die Kondensatoren . . . . .	118
2.3.2	Kondensatoren mit dünnen Folien als Dielektrikum . . . . .	119
2.3.2.1	Aufbau . . . . .	119
2.3.2.2	Eigenschaften . . . . .	121
2.3.2.3	Selbsteilende Kondensatoren (MP und MK) . . . . .	122
2.3.2.4	Kondensatoren für die Leistungselektronik . . . . .	122
2.3.3	Elektrolyt-Kondensatoren . . . . .	124
2.3.3.1	Nasse Aluminium-Elektrolyt- Kondensatoren . . . . .	125
2.3.3.2	Trockene Aluminium-Elektrolyt- Kondensatoren . . . . .	127
2.3.3.3	Trockene Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren	127
2.3.3.4	Nasse Tantal-Elektrolyt- Kondensatoren . . . . .	127
2.3.4	Keramik-Kondensatoren . . . . .	127
2.3.4.1	Werkstoffe und Einteilung . . . . .	127
2.3.4.2	Eigenschaften . . . . .	127
2.3.4.3	Bauformen . . . . .	128
2.3.5	Einstellbare Kondensatoren . . . . .	131
2.3.5.1	Drehkondensatoren . . . . .	131
2.3.5.2	Trimm-Kondensatoren . . . . .	132
2.3.5.3	MIS-Kondensatoren . . . . .	132
2.4	Induktivitäten . . . . .	132
2.4.1	Kerneigenschaften . . . . .	132
2.4.1.1	Luftpulen . . . . .	132
2.4.1.2	Induktivitäten mit Kern . . . . .	133
2.4.1.3	Kernformen . . . . .	133
2.4.1.4	Ersatzschaltbilder . . . . .	134
2.4.1.5	Hysteresekurve . . . . .	135
2.4.1.6	Ferrimagnetisches Material . . . . .	136
2.4.1.7	Ferromagnetika . . . . .	137
2.4.2	Wicklungseigenschaften . . . . .	139
2.4.2.1	Zylinderwicklung (Solenoid) . . . . .	139
2.4.2.2	Wicklungskapazität . . . . .	139
2.4.2.3	Scheibenwicklung . . . . .	140
2.4.2.4	Ringkernspule (Toroid) . . . . .	140
2.4.2.5	Induktivität einer Zylinderspule . . . . .	141

2.5	Dioden . . . . .	142
2.5.1	Schaltdioden . . . . .	143
2.5.2	Schottky-Dioden . . . . .	146
2.5.3	Gleichrichterioden . . . . .	148
2.5.3.1	Netzgleichrichter . . . . .	150
2.5.3.2	Schnelle Gleichrichterioden . . . . .	151
2.5.4	Schottky-Leistungsdioden . . . . .	153
2.5.5	Z-Dioden . . . . .	153
2.5.6	Diac Triggerdioden . . . . .	155
2.5.7	Fotodioden . . . . .	155
2.5.8	Kapazitätsdioden . . . . .	157
2.5.9	Pin-Dioden . . . . .	158
2.5.10	Step-Recovery-Dioden . . . . .	161
2.5.11	Tunneldioden . . . . .	161
2.5.12	Backwarddioden . . . . .	162
<b>3</b>	<b>Transistoren . . . . .</b>	<b>163</b>
	<b>K. Bressler und H. Rudolph</b>	
3.1	Transistoren . . . . .	163
3.1.1	Arten von Transistoren und deren Aufbau . . . . .	163
3.1.2	Beschaltung und Funktion des Transistors . . . . .	165
3.1.3	Wichtige Kennwerte von Transistoren . . . . .	166
3.1.3.1	Eingangswiderstand . . . . .	166
3.1.3.2	Stromverstärkung . . . . .	168
3.1.3.3	Ausgangsleitwert . . . . .	170
3.1.3.4	Spannungsrückwirkung . . . . .	170
3.1.3.5	$h$ -Parameter als Transistorkennwerte . . . . .	170
3.1.3.6	Rauschen . . . . .	171
3.1.4	Weitere Kennwerte . . . . .	172
3.1.4.1	Restströme . . . . .	173
3.1.4.2	Sperrschichtkapazitäten . . . . .	173
3.1.4.3	Transitfrequenz . . . . .	173
3.1.4.4	Schaltzeiten . . . . .	173
3.1.5	Transistor-Grenzwerte . . . . .	173
3.1.5.1	Sperrspannungen . . . . .	173
3.1.5.2	Ströme . . . . .	174
3.1.5.3	Temperaturen . . . . .	174
3.1.5.4	Verlustleistung . . . . .	175
3.1.5.5	Erlaubter Arbeitsbereich . . . . .	176
3.1.6	Typenschlüssel für Halbleiter . . . . .	177
3.1.7	Transistordatenblatt . . . . .	179
3.2	Analoge Grundschaltungen mit bipolaren Transistoren . . . . .	179
3.2.1	Emitterschaltung . . . . .	179
3.2.1.1	Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung . . . . .	183
3.2.1.2	Einstellung des Arbeitspunktes . . . . .	184
3.2.1.3	Praktische Dimensionierung der Emitterschaltung . . . . .	185

	3.2.1.4	Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung . . . . .	187
	3.2.1.5	Emitterschaltung bei höheren Frequenzen . . . . .	188
	3.2.2	Kollektorschaltung . . . . .	189
	3.2.2.1	Boostrapschaltung . . . . .	191
	3.2.3	Basisschaltung . . . . .	191
	3.2.4	Stromquelle . . . . .	193
	3.2.5	Stromspiegel . . . . .	194
	3.2.6	Differenzverstärker . . . . .	195
	3.2.6.1	Gleichtaktverstärkung . . . . .	196
	3.2.6.2	Gleichtaktunterdrückung . . . . .	197
	3.2.6.3	Korrektur der Offsetspannung . . . . .	198
	3.2.6.4	Gegenkopplung im Differenzverstärker . .	199
	3.2.7	Darlingtonschaltung . . . . .	200
	3.2.8	Verstärker für höhere Frequenzen . . . . .	201
	3.2.8.1	Grenzen der Verstärkung (Verstärkungs-Bandbreite-Produkt) . . . . .	202
	3.2.9	Kaskodeschaltung . . . . .	203
3.3		Feldeffekttransistoren . . . . .	204
	3.3.1	Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (JFET) . . . . .	205
	3.3.1.1	Kennlinien und Arbeitsbereiche des Feldeffekttransistors . . . . .	206
	3.3.1.2	Ohm'scher Bereich . . . . .	206
	3.3.1.3	Triodenbereich . . . . .	207
	3.3.1.4	Abschnürbereich . . . . .	207
	3.3.1.5	Durchbruchbereich . . . . .	207
	3.3.2	MOS-Feldeffekttransistoren . . . . .	207
	3.3.2.1	Eingangswiderstand . . . . .	209
	3.3.2.2	Steilheit . . . . .	209
	3.3.2.3	Ausgangsleitwert . . . . .	210
	3.3.2.4	Spannungsrückwirkung . . . . .	210
	3.3.3	Weitere Kennwerte der Feldeffekttransistoren . . . . .	210
	3.3.3.1	Y-Parameter als Kennwerte des Feldeffekttransistors . . . . .	210
	3.3.3.2	Rauschen . . . . .	211
	3.3.3.3	Restströme . . . . .	211
	3.3.3.4	Temperaturverhalten . . . . .	211
	3.3.3.5	Grenzfrequenz . . . . .	212
	3.3.3.6	Schaltzeiten . . . . .	212
	3.3.4	Grenzwerte der Feldeffekttransistoren . . . . .	212
	3.3.4.1	Ströme . . . . .	212
	3.3.4.2	Sperrspannungen . . . . .	213
	3.3.4.3	Temperaturen . . . . .	213
	3.3.4.4	Verlustleistung und erlaubter Arbeitsbereich . . . . .	213
3.4		Schaltungstechnik mit Feldeffekttransistoren . . . . .	213

3.4.1	Übergang vom bipolaren Transistor zum Feldeffekttransistor . . . . .	213
3.4.2	Grundsaltungen der Feldeffekttransistoren . . . . .	214
3.4.3	Stabilisierung des Arbeitspunktes und der Verstärkung durch Gegenkopplung . . . . .	215
3.4.4	Wirkung der Gegenkopplung . . . . .	216
3.4.5	Differenzverstärker mit Feldeffekttransistoren . . . . .	217
3.4.6	Steuerbare Spannungsteiler mit Feldeffekttransistoren . . . . .	218
3.4.7	Feldeffekttransistoren als Schalter für analoge Signale . . . . .	218
3.4.8	Dual-Gate-MOSFET (Doppelgate-MOSFET) . . . . .	219
3.4.9	MOSFET-Leistungstransistoren für Schalter . . . . .	219
3.4.10	MOSFET-Leistungstransistoren für analoge Verstärker . . . . .	225
3.5	Lineare und nichtlineare Verstärker . . . . .	227
3.5.1	Wichtige Eigenschaften linearer Verstärker . . . . .	227
3.5.2	Herleitung der Oberschwingungen und der Mischprodukte . . . . .	227
3.5.3	Messverfahren zur Beurteilung von Verstärkern . . . . .	228
3.5.4	Nichtlineare Verstärker . . . . .	229
3.5.5	Aufbau linearer Verstärker in der Praxis . . . . .	229
3.5.6	Schaltungstechnische Besonderheiten gegengekoppelter Verstärker . . . . .	231
3.5.7	Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Halbleitern . . . . .	232
3.5.8	Rechnergestützte Schaltungsberechnung . . . . .	233
3.6	Zur Übung . . . . .	233
3.7	Quarzoszillatoren . . . . .	234
3.7.1	Grundlagen . . . . .	234
3.7.1.1	Mechanische Analogien . . . . .	234
3.7.1.2	Schwingbedingungen . . . . .	235
3.7.2	Frequenzstabilität und Frequenzgenauigkeit . . . . .	236
3.7.3	Kurzzeitstabilität, Phasenrauschen und Jitter . . . . .	237
3.7.3.1	Kurzzeitstabilität . . . . .	237
3.7.4	Phasenrauschen . . . . .	238
3.7.4.1	Definition . . . . .	238
3.7.5	Phasenjitter . . . . .	239
3.7.6	Langzeitstabilität . . . . .	240
3.7.7	Last- und Betriebsspannungsabhängigkeit der Frequenz . . . . .	241
3.7.8	Frequenzgenauigkeit . . . . .	241
3.7.9	XOs . . . . .	242
3.7.10	Temperaturabhängigkeit der Frequenz . . . . .	242
3.7.11	VCXO . . . . .	243
3.7.11.1	Definition . . . . .	243
3.7.12	Hochfrequente VCXOs . . . . .	244

3.7.12.1	HFF-VCXOs	244
3.7.12.2	Oberton-VCXOs	244
3.7.12.3	Frequenzvervielfacher	244
3.7.12.4	Temperaturabhängigkeit der Frequenz	245
3.7.13	(VC)TCXOs	245
3.7.13.1	Kompensation der Temperaturabhängigkeit der Frequenz	245
3.7.14	(VC)OCXOs	247
3.7.14.1	Stabilisierung der Arbeitstemperatur	247
3.7.15	Auswahlkriterien	249
3.7.16	Kostenparameter von Quarzoszillatoren	250
3.7.17	Vor- und Nachteile von Ausgangssignalformen	250
3.7.18	Anpassung der Schnittstelle zum Verbraucher	251
3.7.19	Ausführungsformen von Quarzoszillatoren	252
3.8	Weiterführende Literatur zu Abschn. 3.1 bis Abschn. 3.5	253
3.8.1	Normen	254
3.8.2	Weiterführende Literatur zu Abschn. 3.7	254
3.8.3	Web-Seiten	254
<b>4</b>	<b>Hochfrequenz-Verstärker</b>	<b>255</b>
	J. Langner	
4.1	Anpassung und Reflexion	255
4.2	Transport der Hochfrequenz auf Leitungen	256
4.3	Wellenwiderstand einer Hochfrequenzleitung	258
4.4	Eingangs- und Ausgangswiderstände von HF-Transistoren	259
4.4.1	S-Parameter	260
4.4.2	Definition der S-Parameter	260
4.4.3	Messung der S-Parameter	261
4.5	Rauschparameter	262
4.5.1	Rauschfaktor	263
4.5.2	Rauschen bei mehrstufigen Verstärkern	264
4.6	Darstellung komplexer Größen	264
4.7	Anwendung des Smith-Diagramms	266
4.7.1	Zur Übung	270
4.8	Aufbau von HF-Schaltungen aus fertigen HF-Bauteilen	270
4.8.1	Verstärker	271
4.8.2	Leistungsteiler (engl.: Power Divider)	272
4.8.3	Richtkoppler – (engl.: Directional Couplers)	272
4.8.4	90°-Hybrid-Koppler – (engl.: 90° Hybrid Coupler)	273
4.8.5	Zirkulator – (engl.: Circulator)	273
4.8.6	Tiefpassfilter – (engl.: Low-Pass Filter) und Hochpassfilter (engl.: High Pass Filter)	274
4.8.7	Bandpassfilter – (engl.: Band-Pass Filter)	274
4.8.8	Mischer – (engl.: Mixer)	275
4.8.9	Demodulator – Detektor (engl.: Demodulator)	276
4.8.10	Beispiel einer HF-Schaltung aus fertigen Komponenten	276



	4.8.11 Zur Übung . . . . .	277
4.9	Weiterführende Literatur . . . . .	278
	4.9.1 Web-Seiten . . . . .	278
<b>5</b>	<b>Bauelemente der Leistungselektronik . . . . .</b>	<b>279</b>
	J. Gutekunst	
5.1	Passive Bauelemente . . . . .	279
	5.1.1 Induktivitäten . . . . .	280
	5.1.2 Stromtransformatoren . . . . .	283
	5.1.3 Kondensatoren . . . . .	285
	5.1.4 Hochleistungswiderstände . . . . .	290
	5.1.5 Hochleistungsdioden . . . . .	292
	5.1.6 Schutzelemente . . . . .	292
5.2	Aktive Bauelemente . . . . .	293
	5.2.1 Power MOS-FET . . . . .	294
	5.2.2 Darlingtonschaltung . . . . .	294
	5.2.3 IGBT . . . . .	295
	5.2.4 Smart Power ICs . . . . .	296
	5.2.5 SCR (Silicon Controlled Rectifier), Thyristor . . . . .	297
	5.2.6 GTO . . . . .	300
	5.2.7 Triac . . . . .	300
	5.2.8 Sicherheitsbeschaltung von Leistungshalbleitern . . . . .	300
	5.2.9 Spannungssteuerung eines Thyristors . . . . .	301
5.3	Weiterführende Literatur . . . . .	302
<b>6</b>	<b>Optoelektronik . . . . .</b>	<b>303</b>
	R. Martin	
6.1	Einleitung . . . . .	303
6.2	Radiometrische und fotometrische Größen . . . . .	304
	6.2.1 Radiometrische Größen . . . . .	305
	6.2.2 Fotometrische Größen . . . . .	306
6.3	Halbleiter-Sender . . . . .	308
	6.3.1 Strahlungsemission aus Halbleitern . . . . .	308
	6.3.2 Lumineszenzdioden . . . . .	309
	6.3.2.1 Wirkungsweise . . . . .	309
	6.3.2.2 Kennwerte . . . . .	310
	6.3.2.3 Kennlinien . . . . .	310
	6.3.2.4 Optische Eigenschaften . . . . .	311
	6.3.2.5 Temperaturverhalten . . . . .	312
	6.3.2.6 Modulationsverhalten . . . . .	313
	6.3.2.7 Bauformen und Anwendungen . . . . .	314
	6.3.2.8 Alterung . . . . .	315
	6.3.2.9 Ansteuerschaltungen . . . . .	316
	6.3.3 Halbleiterlaser . . . . .	318
	6.3.3.1 Laserprinzip . . . . .	318
	6.3.3.2 Laserdiode (Injektionslaser) . . . . .	319
	6.3.3.3 Laserstrukturen . . . . .	321
	6.3.3.4 Optische Eigenschaften . . . . .	322

	6.3.3.5	Modulation	323
	6.3.3.6	Temperaturabhängigkeit	323
	6.3.3.7	Alterung	324
	6.3.3.8	Anwendungen	325
6.4		Displays	325
	6.4.1	Anthropotechnische Gesichtspunkte	325
	6.4.2	Displaytypen	326
	6.4.2.1	Leuchtdioden	326
	6.4.2.2	Vakuum-Fluoreszenz-Displays (VFD)	327
	6.4.2.3	Plasma-Displays (PDP)	327
	6.4.2.4	Flüssigkristallanzeigen (LCD)	327
	6.4.2.5	Organische Leuchtdioden (OLEDs)	329
	6.4.3	Analoganzeigen	332
	6.4.4	Numerische Anzeigen	332
	6.4.4.1	LED-Displays	333
	6.4.4.2	Flüssigkristallanzeigen (LCD)	334
	6.4.5	Alphanumerische Anzeigen	335
6.5		Halbleiter-Detektoren	336
	6.5.1	Strahlungsabsorption in Halbleitern	336
	6.5.2	Gütekriterien von Detektoren	337
	6.5.2.1	Empfindlichkeit	337
	6.5.2.2	Rauschäquivalente Leistung (NEP)	338
	6.5.2.3	Detektivität (Nachweisvermögen)	338
	6.5.3	Fotowiderstand	338
	6.5.4	Fotodiode	341
	6.5.4.1	Wirkungsweise	341
	6.5.4.2	Betriebszustände	343
	6.5.4.3	pin-Fotodiode	346
	6.5.4.4	Rauschen in pin-Fotodioden	346
	6.5.4.5	Lawinenfotodiode	348
	6.5.5	Solarzelle	351
	6.5.6	Wirkungsweise	351
	6.5.7	Wirkungsgrad	353
	6.5.7.1	Technologie	356
	6.5.8	Fototransistor	356
	6.5.9	Fotothyristor	358
	6.5.10	Bildsensoren	359
	6.5.10.1	CCD-Sensoren	360
	6.5.10.2	CMOS Active-Pixel Sensor	363
	6.5.10.3	Sensorgößen	363
6.6		Optokoppler	363
6.7		Lichtwellenleiter	367
6.8		Zur Übung	373
6.9		Weiterführende Literatur	375

<b>7</b>	<b>Sensoren</b> . . . . .	<b>377</b>
	E. Hering	
7.1	Grundlagen . . . . .	377
	7.1.1 Definition und Einteilung . . . . .	377
	7.1.2 Wirtschaftliche und technische Bedeutung . . . . .	377
7.2	Sensoren für die wichtigsten Messgrößen . . . . .	382
	7.2.1 Weg- und Positions-Sensoren . . . . .	382
	7.2.2 Kraft- und Druck-Sensoren . . . . .	387
	7.2.3 Temperatur-Sensoren . . . . .	388
7.3	Werkstoffe und Technologien . . . . .	390
	7.3.1 Siliciumtechnik . . . . .	390
	7.3.1.1 Vorteile von Silicium . . . . .	390
	7.3.1.2 Physikalische Effekte . . . . .	391
	7.3.2 Dünnschichttechnik . . . . .	393
	7.3.2.1 Verfahren . . . . .	393
	7.3.2.2 Anwendungen . . . . .	393
	7.3.3 Dickschichttechnik . . . . .	394
	7.3.4 Faseroptische Sensoren . . . . .	395
	7.3.4.1 Modulation der Lichtstärke . . . . .	395
	7.3.4.2 Modulation der Wellenlänge . . . . .	396
	7.3.4.3 Modulation der Polarisierung . . . . .	396
	7.3.5 Chemische Sensoren . . . . .	396
	7.3.5.1 Elektrochemische Sensoren . . . . .	396
	7.3.5.2 Chemische Feldeffekttransistoren . . . . .	397
	7.3.5.3 Optochemische Sensoren (Optoden) . . . . .	397
7.4	Bevorzugte Einsatzgebiete . . . . .	398
7.5	Weiterführende Literatur . . . . .	400
<b>8</b>	<b>Analoge integrierte Schaltungen</b> . . . . .	<b>401</b>
	K. Bressler und R. Martin	
8.1	Herstellung und Technologie . . . . .	401
8.2	Operationsverstärker . . . . .	402
	8.2.1 Idealer und realer Operationsverstärker . . . . .	402
	8.2.2 Schaltungstechnischer Aufbau . . . . .	403
	8.2.2.1 Eingangsstufe als Differenzverstärker . . . . .	406
	8.2.2.2 Zweite Stufe als Spannungsverstärker . . . . .	406
	8.2.2.3 Endstufe als Stromverstärker . . . . .	407
	8.2.3 Beispiel eines Standardverstärkers . . . . .	408
	8.2.4 Operationsverstärker für höhere Anforderungen . . . . .	411
	8.2.5 Stabilitätsbetrachtung . . . . .	412
	8.2.6 Verstärker mit sehr kleiner Offsetspannung (Zero Drift) . . . . .	416
	8.2.7 Verstärker für eine Versorgungsspannung . . . . .	417
	8.2.8 Rail to Rail Verstärker . . . . .	418
	8.2.8.1 Ausgangsstufe . . . . .	419
	8.2.9 Sehr schnelle Operationsverstärker . . . . .	419
	8.2.10 Verschiedene Operationsverstärker mit besonderen Eigenschaften . . . . .	421

8.3	Operationsverstärker mit statischer Beschaltung . . . . .	421
8.3.1	Invertierender Spannungsverstärker . . . . .	424
8.3.2	Nicht invertierender Spannungsverstärker . . . . .	425
8.3.3	Subtrahierverstärker . . . . .	426
8.3.3.1	Instrumentenverstärker . . . . .	427
8.3.4	Schmitt-Trigger . . . . .	428
8.3.5	Nichtlinearer Verstärker . . . . .	429
8.3.6	Addierender Verstärker, invertierend . . . . .	431
8.3.7	Konstantstromquellen . . . . .	432
8.3.8	Idealer Einweggleichrichter . . . . .	433
8.3.9	Zweiweggleichrichter ohne gemeinsames Potenzial . . . . .	434
8.3.10	Zweiweggleichrichter mit gemeinsamem Potenzial . . . . .	434
8.3.11	Spitzenwertgleichrichter . . . . .	435
8.3.12	Logarithmierschaltung . . . . .	435
8.3.12.1	Nichtlinearer Widerstand . . . . .	436
8.3.13	Delogarithmierschaltung (Exponentialverstärker) . . . . .	437
8.4	Operationsverstärker mit dynamischer Beschaltung . . . . .	438
8.4.1	Integrator . . . . .	439
8.4.2	Differenzierer . . . . .	443
8.4.3	Filterschaltungen . . . . .	444
8.4.3.1	Tiefpass 1. Ordnung . . . . .	445
8.4.3.2	Tiefpass 2. Ordnung . . . . .	446
8.4.3.3	Hochpass 1. Ordnung . . . . .	448
8.4.3.4	Hochpass 2. Ordnung . . . . .	449
8.4.3.5	Bandpass (selektives Filter) . . . . .	450
8.4.3.6	Bandsperrschaltung . . . . .	452
8.4.3.7	Filter höherer Ordnung . . . . .	453
8.5	Weitere wichtige integrierte Anlogschaltungen . . . . .	454
8.5.1	Komparatoren . . . . .	454
8.5.2	Spannungsregler . . . . .	455
8.5.2.1	Getaktete Regler . . . . .	456
8.5.2.2	Ladungspumpe (Charge Pump) . . . . .	456
8.5.3	Bandabstands-Referenzelement (Bandgap Voltage Reference) . . . . .	457
8.6	Zur Übung . . . . .	461
8.7	Weiterführende Literatur . . . . .	462
<b>9</b>	<b>Digital-Analog (DA)-, Analog-Digital (AD)-Wandler und digitale Filter . . . . .</b>	<b>463</b>
	<b>K. Bressler und J. Endres</b>	
9.1	Digital-Analog-Wandler (DA-Wandler) . . . . .	463
9.1.1	R-2R-Leiternetzwerk . . . . .	464
9.1.2	Multiplizierender DA-Wandler . . . . .	465
9.1.3	Vier-Quadranten multiplizierender DA-Wandler . . . . .	466
9.1.4	Parallel-DA-Wandler . . . . .	467
9.1.5	Datenwandler mit mikroprozessorkompatibler Schnittstelle . . . . .	468

9.1.6	Unerwünschte Spitzen beim Weiterzählen des digitalen Eingangswertes . . . . .	469
9.1.7	Fehler bei der Datenumsetzung . . . . .	471
9.1.8	Delta-Sigma DA-Wandler . . . . .	472
9.2	Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler) . . . . .	473
9.2.1	Integrierende Analog-Digital-Wandler . . . . .	473
9.2.2	Analog-Digital-Wandler nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation . . . . .	477
9.2.3	Abtast- und Halteschaltung (Sample and Hold) . . . . .	479
9.2.4	Parallel-Analog-Digital-Wandler . . . . .	480
9.2.4.1	AD-Wandler nach dem Pipelineverfahren . . . . .	481
9.2.5	Analog-Digital-Wandler nach dem Delta-Sigma-Verfahren . . . . .	482
9.3	Digitale Filter . . . . .	486
9.3.1	Grundlagen und Eigenschaften zeitdiskreter LTI-Systeme . . . . .	486
9.3.2	Infinite Impulse Response-Filter (IIR-Filter) . . . . .	489
9.3.2.1	Strukturen . . . . .	489
9.3.2.2	Eigenschaften . . . . .	489
9.3.2.3	Entwurfsmethoden . . . . .	489
9.3.3	Finite Impulse Response (FIR)-Filter . . . . .	491
9.3.3.1	Strukturen . . . . .	491
9.3.3.2	Eigenschaften . . . . .	492
9.3.3.3	Entwurfsmethoden . . . . .	493
9.3.4	Implementierung digitaler Filter . . . . .	494
9.3.4.1	Implementierung auf einem Prozessor . . . . .	495
9.3.4.2	Implementierung auf einem Logikbaustein . . . . .	497
9.4	Weiterführende Literatur . . . . .	498
<b>10</b>	<b>Elektronische Regler . . . . .</b>	<b>499</b>
	J. Kempkes	
10.1	Steuerung und Regelung . . . . .	499
10.2	Grundlagen . . . . .	500
10.2.1	Aufbau des Regelkreises . . . . .	501
10.2.2	Regelstrecke . . . . .	501
10.2.3	Offener und geschlossener Regelkreis . . . . .	508
10.2.4	Stabilität . . . . .	510
10.3	Reglerentwurf . . . . .	511
10.3.1	Reglertypen . . . . .	512
10.3.2	Kaskadenregelung . . . . .	515
10.3.3	Optimierung und Simulation . . . . .	519
10.3.4	Empirische Einstellregeln . . . . .	521
10.4	Zur Übung . . . . .	523
10.5	Weiterführende Literatur . . . . .	523

<b>11 Grundlagen der digitalen Schaltungstechnik</b> . . . . .	<b>525</b>
J. Gutekunst	
11.1 Zahlensysteme . . . . .	525
11.1.1 Duales Zahlensystem . . . . .	526
11.1.2 Hexadezimals Zahlensystem . . . . .	527
11.1.3 BCD-Zahlensystem . . . . .	530
11.1.4 Erweiterungen des binären Zahlensystems . . . . .	531
11.1.4.1 Negative Zahlen . . . . .	531
11.1.4.2 Festkomma- und Gleitkommazahlen . . . . .	532
11.2 Kodes . . . . .	535
11.2.1 Gray-Kode . . . . .	536
11.2.2 Fernschreibe-Kode . . . . .	537
11.2.3 ASCII-Kode . . . . .	539
11.2.4 Redundante Kodes . . . . .	542
11.2.5 Fehlererkennende Kodes . . . . .	542
11.2.6 Fehlerkorrigierende Kodes . . . . .	544
11.3 Grundlagen der Boole'schen Algebra . . . . .	547
11.3.1 Binäre Verknüpfungen . . . . .	547
11.3.2 Gesetze von Boole und De Morgan . . . . .	550
11.3.2.1 Gesetze der Schaltalgebra . . . . .	550
11.3.2.2 Gesetze von De Morgan . . . . .	551
11.3.3 Entwicklung einer Schaltung mit Hilfe der Boole'schen Algebra . . . . .	553
11.4 Minimierung nach Karnaugh-Veitch . . . . .	555
11.4.1 Grundlagen . . . . .	555
11.4.2 Karnaugh-Veitch-Diagramm für drei Eingangsvariable . . . . .	558
11.4.3 Karnaugh-Veitch-Diagramm für vier Eingangsvariable . . . . .	559
11.4.4 Karnaugh-Veitch-Diagramm für fünf Eingangsvariable . . . . .	560
11.4.5 Karnaugh-Veitch-Diagramm für sechs und mehr Eingangsvariable . . . . .	562
11.4.6 Beispiele zur Karnaugh-Veitch-Minimierung . . . . .	564
11.5 Zur Übung . . . . .	566
11.6 Weiterführende Literatur . . . . .	569
<b>12 Digitale Bauelemente</b> . . . . .	<b>571</b>
J. Gutekunst	
12.1 Logikfamilien . . . . .	572
12.1.1 TTL . . . . .	575
12.1.2 FAST . . . . .	578
12.1.3 CMOS . . . . .	579
12.1.4 High-Speed-CMOS . . . . .	583
12.1.5 ECL . . . . .	587
12.1.6 Schaltzeichen und Gehäuseformen . . . . .	589
12.2 Flip Flops und Zähler . . . . .	591
12.2.1 Flip Flops . . . . .	591

12.2.2	Zähler . . . . .	594
12.3	Speicherbauteile und Speicheraufbau . . . . .	596
12.3.1	Flüchtige Speicher . . . . .	597
12.3.2	Nicht flüchtige Speicher . . . . .	599
12.3.3	Sonderformen von Speicherbauteilen . . . . .	601
12.3.4	Aufbau großer Speichersysteme . . . . .	603
12.4	Mikrorechner . . . . .	604
12.4.1	Mikroprozessoren . . . . .	606
12.4.2	Single-Chip-Mikrocomputer . . . . .	608
12.4.3	RISC-Computer . . . . .	610
12.4.4	Transputer . . . . .	611
12.5	Zur Übung . . . . .	612
12.6	Weiterführende Literatur . . . . .	613
<b>13</b>	<b>Entwicklung digitaler Schaltungen . . . . .</b>	<b>615</b>
	J. Gutekunst	
13.1	Entwicklungsphasen . . . . .	615
13.2	Pulsfahrplan . . . . .	621
13.3	Leitungen für digitale Signale . . . . .	624
13.3.1	Bandbegrenzung digitaler Signale . . . . .	624
13.3.2	Reflexionen . . . . .	626
13.3.2.1	Abgeschlossene Leitung . . . . .	626
13.3.2.2	Offene Leitung . . . . .	633
13.4	Störfreier Entwurf digitaler Schaltungen (Glitch-Free-Design) . . . . .	638
13.5	Phase Locked Loop . . . . .	641
13.5.1	Grundlagen . . . . .	641
13.5.2	Digitaler PLL . . . . .	644
13.5.3	Tiefpass 1. Ordnung . . . . .	651
13.6	Zur Übung . . . . .	652
13.7	Weiterführende Literatur . . . . .	654
<b>14</b>	<b>ASIC . . . . .</b>	<b>655</b>
	J. Gutekunst	
14.1	Übersicht . . . . .	657
14.1.1	Digitale ASIC-Familien . . . . .	657
14.1.2	Analoge ASIC . . . . .	658
14.2	Programmierbare logische Bauteile (PLD) . . . . .	661
14.2.1	Aufbau des PAL (Programmable Array Logic) . . . . .	662
14.2.1.1	Eingangsschaltung des PALs . . . . .	663
14.2.1.2	Verknüpfungen im AND-Array . . . . .	663
14.2.1.3	Verknüpfungen im OR-Array . . . . .	664
14.2.1.4	Ausgangsschaltungen . . . . .	664
14.2.2	Realisierung einer Schaltung . . . . .	667
14.2.3	Testen von PLD-Bauteilen . . . . .	668
14.3	Digitale Gate-Arrays . . . . .	671
14.3.1	Kanal-Gate-Array . . . . .	671
14.3.2	Kanallose Gate-Arrays (Sea of Gates) . . . . .	672

14.3.3	Programmierbare Gate-Arrays . . . . .	673
14.3.3.1	Logic Cell Array (LCA) . . . . .	674
14.3.3.2	Field Programmable Gate-Array (FPGA) . . . . .	675
14.4	Standard-Zellen-ASIC . . . . .	677
14.4.1	Aufbau der Standard-Zellen-ASIC . . . . .	679
14.4.2	Elektronenstrahl-Direkt-Schreibverfahren . . . . .	680
14.4.3	Standardisierte Kundensaltkreise (Application Specific Standard Products, ASSP) . . . . .	681
14.5	Weiterführende Literatur . . . . .	682
<b>15</b>	<b>Schnittstellen, Bussysteme und Netze . . . . .</b>	<b>683</b>
	<b>J. Gutekunst</b>	
15.1	Grundbegriffe der Datenübertragung . . . . .	684
15.1.1	Verbindung, Betrieb und Übertragung . . . . .	684
15.1.2	Grundlagen zur seriellen Datenübertragung . . . . .	686
15.1.3	Grundlagen zur parallele Datenübertragung . . . . .	688
15.1.4	Topologien . . . . .	689
15.2	Parallele Schnittstellen . . . . .	690
15.2.1	IEC-Bus . . . . .	690
15.2.2	SCSI-Bus . . . . .	692
15.3	Serielle Schnittstellen . . . . .	695
15.3.1	TIA-232-F, V.24-Schnittstelle . . . . .	695
15.3.1.1	Signale . . . . .	695
15.3.1.2	Elektrische Eigenschaften . . . . .	697
15.3.1.3	Verbindungen und Fehlersuche . . . . .	697
15.3.1.4	Anschlussmöglichkeiten . . . . .	698
15.3.1.5	Funktionsüberprüfung . . . . .	700
15.3.2	I <sup>2</sup> C -Schnittstelle . . . . .	701
15.3.3	SPI-Schnittstelle . . . . .	703
15.4	Bussysteme . . . . .	704
15.4.1	Struktur und Arbitrierungsverfahren . . . . .	704
15.4.1.1	Arbitrierung . . . . .	705
15.4.1.2	Kollisionsbehaftete Arbitrierung . . . . .	705
15.4.1.3	Kollisionsfreie Arbitrierung . . . . .	705
15.4.2	Profibus . . . . .	706
15.4.3	CAN-Bus . . . . .	708
15.4.3.1	DeviceNet . . . . .	712
15.5	Netze . . . . .	713
15.5.1	Einführung . . . . .	713
15.5.2	Das OSI-Modell . . . . .	714
15.5.2.1	Beschreibung . . . . .	714
15.5.2.2	Schichten des OSI-Modells . . . . .	716
15.5.3	Zugriffsverfahren bei Netzen . . . . .	719
15.6	Ethernet . . . . .	720
15.6.1	Einführung . . . . .	720
15.6.1.1	Aufbau des Ethernet Telegramms . . . . .	720
15.6.1.2	IP-Adresse und Subnet-Mask . . . . .	722
15.6.1.3	CSMA/CD . . . . .	723



15.6.2	Ethernet Hub und Ethernet Switch	724
15.6.3	TCP/IP	726
15.7	Weiterführende Literatur	726
15.7.1	Organisationen im Web:	727
<b>16</b>	<b>Speicherprogrammierbare Steuerungen</b>	<b>729</b>
	R. Hönle	
16.1	Einführung	729
16.2	Aufbau und Funktionsweise einer SPS	735
16.3	Befehle einer SPS	738
16.3.1	Basisfunktionen	738
16.3.1.1	Binärverknüpfungen	738
16.3.1.2	Speicherfunktionen	742
16.3.1.3	Flankenauswertung	743
16.3.1.4	Zeitfunktionen	744
16.3.1.5	Zählfunktionen	748
16.3.2	Digitalfunktionen	748
16.3.2.1	Übertragungsfunktionen	749
16.3.2.2	Wort- und Doppelwortverknüpfungen	750
16.3.2.3	Vergleichsfunktionen	750
16.3.2.4	Wandlungsfunktionen	751
16.3.2.5	Rechenfunktionen	754
16.3.3	Sprungoperationen	756
16.3.4	Programmfluss-Steuerung	759
16.4	Programmierung einer SPS	760
16.5	Zur Übung	773
16.6	Weiterführende Literatur	774
16.7	Marken und Warenzeichen	774
<b>17</b>	<b>Spannungsversorgungen</b>	<b>775</b>
	J. Gutekunst	
17.1	Trafonetzgeräte	775
17.1.1	Potenzialtrennung	776
17.1.2	Transformator	776
17.1.3	Transformator-Netzteil	778
17.1.4	Gleichrichter-Schaltungen	778
17.1.4.1	Einweg-Gleichrichter	778
17.1.4.2	Halbbrücke oder Mittelpunkt-Schaltung	779
17.1.4.3	Vollbrücke (Graetz-Schaltung)	780
17.1.4.4	Spannungsverdoppler (Delon-Schaltung)	780
17.1.4.5	Spannungs-Verdoppler (Villard-Schaltung)	781
17.1.4.6	Spannungs-Vervielfacher nach Villard	781
17.1.4.7	Ladungspumpe	781
17.1.5	Lineare Regler	782
17.1.5.1	Längsregler	782

17.1.5.2	Integrierte Spannungsregler . . . . .	784
17.1.5.3	Shuntregler (Parallel-Stabilisierung) . . . . .	786
17.2	Spannungswandler . . . . .	786
17.2.1	Prinzip der getakteten Stromversorgung . . . . .	787
17.2.2	Durchflusswandler . . . . .	789
17.2.2.1	Flusswandler Varianten . . . . .	794
17.2.2.2	Transduktor (Sättigungsdrossel) . . . . .	797
17.2.3	Sperrwandler oder Inverswandler . . . . .	797
17.3	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) . . . . .	798
17.3.1	Aufbau der USV . . . . .	798
17.3.2	Störunterdrückung durch die USV . . . . .	801
17.4	Entstörtechnik und Netzfilter . . . . .	802
17.4.1	Entstörkondensatoren . . . . .	802
17.4.2	Netzfilter . . . . .	803
17.4.3	Dreiphasen Netzfilter . . . . .	803
17.5	Zur Übung . . . . .	805
17.6	Weiterführende Literatur . . . . .	805
<b>18</b>	<b>Lösungen der Übungsaufgaben . . . . .</b>	<b>807</b>
	E. Hering et al.	
18.1	Grundlagen der Elektrotechnik . . . . .	807
18.2	Passive Bauelemente . . . . .	809
18.3	Aktive Bauelemente . . . . .	809
18.4	Hochfrequenz (HF)-Verstärker . . . . .	809
18.5	Bauelemente der Leistungselektronik . . . . .	810
18.6	Optoelektronik . . . . .	810
18.7	Sensoren . . . . .	811
18.8	Analoge integrierte Schaltungen . . . . .	811
18.9	Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandler . . . . .	811
18.10	Elektronische Regler . . . . .	811
18.11	Grundlagen der digitalen Schaltungstechnik . . . . .	814
18.12	Digitale Bauelemente . . . . .	818
18.13	Entwicklung digitaler Schaltungen . . . . .	818
18.14	ASIC . . . . .	821
18.15	Schnittstellen, Bussysteme und Netze . . . . .	821
18.16	Speicherprogrammierbare Steuerungen . . . . .	821
18.17	Spannungsversorgung . . . . .	824
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>825</b>