

Wolfgang Reinhold

# **Elektronische Schaltungstechnik**

Grundlagen der Analogelektronik

2., neu bearbeitete Auflage

Mit 435 Bildern, 56 Beispielen und 95 Aufgaben

**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

# Inhalt

<b>Q</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Halbleiterelektronik</b>	<b>13</b>
1.1	Leitfähigkeit von Halbleitern	13
1.1.1	Eigenleitung	13
1.1.2	Halbleiter mit Störstellen	15
1.2	Ladungsträgergeneration in Halbleitern	19
1.3	Ladungsträgertransport in Halbleitern	20
1.4	Aufgaben	21
<b>Q</b>	<b>Berechnungsmethoden elektronischer Schaltungen</b>	<b>22</b>
2.1	Analysemethoden und -Werkzeuge zur Schaltungsberechnung	23
2.1.1	Ersatzschaltbilder	25
2.1.2	Groß- und Kleinsignalanalyse	26
2.1.3	Kleinsignalersatzschaltung	27
2.2	Vierpoldarstellung	28
2.3	Zusammenschaltung von Vierpolen	32
2.4	Vierpole mit äußerer Beschaltung	33
2.5	Darstellung des Übertragungsverhaltens	34
2.6	Signalflussdarstellung	36
2.7	Computergestützte Netzwerkanalyse	37
2.8	Aufgaben	39
<b>Q</b>	<b>Halbleiterdioden</b>	<b>41</b>
3.1	pn-Übergang	41
3.1.1	Wirkprinzip	41
3.1.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	45
3.1.3	Ladungsspeicherung	46
3.2	Kleinsignalverhalten	47
3.3	Schaltverhalten	50
3.4	Temperaturverhalten	52
3.5	Spezielle Dioden und ihre Anwendungen	53
3.5.1	Gleichrichterdiode	53
3.5.2	Z-Diode	56
3.5.3	Kapazitätsdiode	58
3.5.4	Tunneldiode	60
3.5.5	Schottky-Diode	60
3.6	Mikrowellendioden	61
3.6.1	IMPATT-Diode	61
3.6.2	Gunn-Diode	62
3.7	Aufgaben	63

<b>Q</b>	<b>Bipolartransistoren</b>	<b>65</b>
	4.1 Wirkprinzip	65
	4.2 Strom-Spannungs-Kennlinie	67
	4.3 Nutzbarer Betriebsbereich	72
	4.4 Bipolartransistor als Verstärker	74
	4.4.1 Kleinsignalmodell des Bipolartransistors	75
	4.4.2 Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens des Bipolartransistors	78
	4.5 Temperaturverhalten von Bipolartransistoren	83
	4.6 Arbeitspunktabhängigkeit der Stromverstärkung	85
	4.7 Bipolartransistor als elektronischer Schalter	86
	4.7.1 Schaltung eines Transistorschalters	86
	4.7.2 Stationäres Schaltermodell des Bipolartransistors	87
	4.7.3 Dynamisches Verhalten eines Transistorschalters	88
	4.8 Aufgaben	91
<b>Q</b>	<b>Thyristoren</b>	<b>95</b>
	5.1 Aufbau und Wirkungsweise	95
	5.2 Thyristorvarianten	97
	5.3 Anwendungen von Thyristoren	98
	5.4 Aufgaben	101
<b>[j]</b>	<b>Feldeffekttransistoren</b>	<b>102</b>
	6.1 MOSFET	103
	6.1.1 Wirkprinzipien verschiedener MOSFET-Typen	103
	6.1.2 Strom-Spannungs-Kennlinie eines MOSFET	104
	6.1.3 Ableitung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines MOSFET	108
	6.1.4 MOSFET als Verstärker	110
	6.1.4.1 Kleinsignalmodell des MOSFET	110
	6.1.4.2 Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens	113
	6.1.4.3 Effekte bei integriertem MOSFET	114
	6.1.5 MOSFET als elektronischer Schalter	115
	6.1.6 Thermisches Verhalten des MOSFET	117
	6.2 Sperrschicht-FET	118
	6.2.1 Strom-Spannungs-Kennlinie eines SFET	119
	6.2.2 Kleinsignalverhalten eines SFET	119
	6.3 SFET als Verstärker	120
	6.4 Aufgaben	122
<b>Q</b>	<b>Rauschen elektronischer Bauelemente</b>	<b>125</b>
	7.1 Widerstandsrauschen	125
	7.2 Diodenrauschen	127
	7.3 Transistorrauschen	128
	7.4 Rauschspannung	129
	7.5 Rauschfaktor	130
	7.6 Aufgabe	132

<b>Q</b>	<b>Operationsverstärker</b>	<b>133</b>
8.1	Der ideale Operationsverstärker	133
8.2	Aufbau eines Operationsverstärkers	134
8.3	Statische Kenngrößen realer Operationsverstärker	135
8.4	Dynamische Kenngrößen realer Operationsverstärker	139
8.5	Verstärkerschaltungen mit Operationsverstärker	140
8.5.1	Grundsaltungen eines Spannungsverstärkers	141
8.5.2	Kompensation von Offsetspannung und Offsetstrom des Operationsverstärkers	142
8.6	Dynamisches Verhalten von Operationsverstärkerschaltungen	143
8.7	Rauschen in Operationsverstärkern	145
8.8	Moderne Operationsverstärkertypen	146
8.9	Aufgaben	148
<b>Qj</b>	<b>Optoelektronische Bauelemente und Halbleitersensoren ....</b>	<b>150</b>
9.1	Fotosensoren	150
9.2	Leuchtdioden	153
9.3	Optokoppler	156
9.4	Spezielle Halbleitersensoren	156
9.4.1	Temperatursensoren	156
9.4.2	Magnetfeldsensoren	158
9.4.3	Piezowandler	159
9.5	Aufgaben	160
<b>BQ</b>	<b>Lineare Verstärkergrundsaltungen</b>	<b>162</b>
10.1	Allgemeines Kleinsignalmodell eines Spannungsverstärkers	162
10.2	Einstufige Verstärker mit Bipolartransistoren	164
10.2.1	Emitterschaltung	165
10.2.2	Basisschaltung	173
10.2.3	Kollektorschaltung (Emitterfolger)	175
10.2.4	Vergleich der einstufigen Transistorverstärkerschaltungen	177
10.3	Einstufige Verstärker mit Feldeffekt-Transistoren	178
10.4	Grundsaltungen mit mehreren Transistoren	179
10.4.1	Kaskodeschaltung	179
10.4.2	Differenzverstärker	181
10.4.3	Stromspiegel	185
10.4.4	Differenzverstärker mit Stromspiegellast	188
10.4.5	Transistor-Stromquellen	189
10.4.6	Darlington-Schaltung	192
10.4.7	Leistungsendstufen	193
10.5	Frequenzverhalten von Verstärkerstufen	199
10.6	Kopplung von Verstärkerstufen	200
10.7	Aufgaben	201

<b>Q</b>	<b>Gegenkopplung</b>	<b>206</b>
	11.1 Allgemeines Modell der Gegenkopplung	206
	11.2 Schaltungsarten der Gegenkopplung	208
	11.3 Effekte der Gegenkopplung	209
	11.3.1 Einstellung eines definierten Übertragungsfaktors	209
	11.3.2 Linearisierung des Übertragungsfaktors	209
	11.3.3 Parameterempfindlichkeit	211
	11.3.4 Einfluss der Gegenkopplung auf Ein- und Ausgangsimpedanz	212
	11.3.5 Übertragungsbandbreite	214
	11.3.6 Miller-Effekt	215
	11.3.7 Bootstrap-Effekt	216
	11.3.8 Gezielte Beeinflussung des Frequenzganges eines Verstärkers	216
	11.4 Anwendungen der Gegenkopplungsvarianten	217
	11.4.1 Operationsverstärkerschaltungen mit Gegenkopplung	217
	11.4.2 Transistorschaltungen mit Gegenkopplung	219
	11.5 Stabilität rückgekoppelter Verstärker	222
	11.6 Frequenzgangkorrektur von Verstärkern	225
	11.7 Aufgaben	227
<b>  &lt;</b>	<b>Schaltungen mit Operationsverstärkern</b>	<b>229</b>
	12.1 Lineare Verstärker	229
	12.1.1 Nicht invertierender Verstärker	229
	12.1.2 Invertierender Verstärker	230
	12.2 Rechenschaltungen	231
	12.2.1 Addierer	231
	12.2.2 Subtrahierer	232
	12.2.3 Differenzierer	235
	12.2.4 Integrator	238
	12.2.5 Multiplizierer	241
	12.2.6 Dividierer	242
	12.3 Nichtlineare Schaltungen	242
	12.4 Komparatoren und Schmitt-Trigger	243
	12.5 Stromquellen	245
	12.6 Schaltungstechnik mit modernen Operationsverstärkern	246
	12.6.1 VC-OPV und seine Anwendung	246
	12.6.2 CV-OPV als Hochfrequenz-Baublock	248
	12.6.3 CC-OPV und seine Anwendung als idealer Transistor	250
	12.7 Elektronische Regler	251
	12.7.1 P-Regler	252
	12.7.2 PI-Regler	252
	12.7.3 PID-Regler	253
	12.8 Aufgaben	256

<b>Filterschaltungen</b>	<b>257</b>
13.1 Filtereigenschaften und Kennwerte	257
13.2 Passive Filter	262
13.3 Aktive i?C-Filter	266
13.3.1 Tiefpässe 2. Ordnung	266
13.3.2 Hochpässe 2. Ordnung	271
13.3.3 Bandpässe 2. Ordnung	274
13.3.4 Bandsperren 2. Ordnung	278
13.4 Universalfilter	280
13.5 SC-Filter	281
13.5.1 SC-Integrator	281
13.5.2 Schaltungsrealisierung von SC-Filtern	283
13.6 Aufgaben	284
<b>Schwingungserzeugung</b>	<b>286</b>
14.1 Sinusoszillatoren	286
14.1.1 Zweipoloszillatoren	286
14.1.2 Vierpoloszillatoren	289
14.1.2.1 Grundstruktur und Schwingbedingung	289
14.1.2.2 RC-Oszillatoren	290
14.1.2.3 LC-Oszillatoren	293
14.1.2.4 Quarzoszillatoren	295
14.2 Impulsoszillatoren	298
14.2.1 Funktionsgeneratoren	298
14.2.2 Relaxationsoszillatoren	299
14.2.2.1 Dreieck-Rechteck-Generator	299
14.2.2.2 Kippschaltungen	300
14.3 Aufgaben	302
<b>Frequenzumsetzer</b>	<b>303</b>
15.1 Amplitudenmodulation	304
15.1.1 AM-Modulatoren	305
15.1.2 AM-Demodulatoren	307
15.2 Frequenzmodulation	310
15.2.1 FM-Modulatoren	313
15.2.2 FM-Demodulatoren	314
15.3 Phasenmodulation	315
15.3.1 PM-Modulatoren	316
15.3.2 PM-Demodulatoren	317
15.4 Mischer	317

<b>IQ Stromversorgungseinheiten</b>	<b>321</b>
16.1 Gleichrichterschaltungen	321
16.2 Spannungsstabilisierung	325
16.2.1 Ungeregelte Stabilisierungsschaltungen	326
16.2.2 Kontinuierliche Spannungsregler	326
16.2.3 Diskontinuierliche Spannungsregler	328
16.2.3.1 Drosselregler	329
16.2.3.2 Ladungspumpen	333
16.3 Erzeugung von Referenzspannungen	335
16.3.1 Referenzspannungsquellen mit Z-Dioden	335
16.3.2 Bandgap-Referenz	336
16.4 Schaltnetzteile	338
16.5 Aufgaben	341
<b>IQ Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler</b>	<b>342</b>
17.1 Kennwerte von A/D- und D/A-Wandlern	343
17.1.1 Stationäre Kennwerte	343
17.1.2 Dynamische Kennwerte	346
17.2 A/D-Wandlungsverfahren	347
17.2.1 A/D-Wandlung nach dem Zählverfahren	348
17.2.2 A/D-Wandlung mit sukzessiver Approximation	350
17.2.3 A/D-Wandlung nach dem Parallelverfahren	350
17.2.4 A/D-Wandlung nach dem Pipeline-Verfahren	351
17.2.5 Sigma-Delta-Wandler	352
17.3 D/A-Wandlungsverfahren	354
17.3.1 D/A-Wandlung nach dem Zählverfahren	355
17.3.2 D/A-Wandlung nach dem Wägeverfahren	356
17.3.3 D/A-Wandlung nach dem Parallelverfahren	359
17.3.4 Fehlerkorrigierende D/A-Wandlung	359
17.4 Aufgaben	360
<b>Formelzeichen</b>	<b>362</b>
<b>Literatur</b>	<b>365</b>
<b>Index</b>	<b>369</b>