

# Halbleiter-Schaltungstechnik

Bearbeitet von  
Ulrich Tietze, Christoph Schenk, Eberhard Gamm

15., überarbeitete und erweiterte Auflage 2016. Buch. XXXVII, 1815 S. Hardcover  
ISBN 978 3 662 48354 1  
Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Elektronik > Bauelemente, Schaltkreise](#)

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I. Grundlagen

---

<b>1. Diode</b> .....	<b>3</b>
1.1 Verhalten einer Diode .....	4
1.1.1 Kennlinie .....	4
1.1.2 Beschreibung durch Gleichungen .....	5
1.1.3 Schaltverhalten .....	7
1.1.3.1 Schaltverhalten bei ohmscher Last .....	8
1.1.3.2 Schaltverhalten bei ohmsch-induktiver Last .....	9
1.1.4 Kleinsignalverhalten .....	10
1.1.5 Grenzdaten und Sperrströme .....	10
1.1.5.1 Grenzspannungen .....	10
1.1.5.2 Grenzströme .....	11
1.1.5.3 Sperrstrom .....	11
1.1.5.4 Maximale Verlustleistung .....	11
1.1.6 Thermisches Verhalten .....	12
1.1.7 Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter .....	12
1.2 Aufbau einer Diode .....	13
1.2.1 Einzeldiode .....	13
1.2.1.1 Innerer Aufbau .....	13
1.2.1.2 Gehäuse .....	14
1.2.2 Integrierte Diode .....	14
1.2.2.1 Innerer Aufbau .....	15
1.2.2.2 Substrat-Diode .....	15
1.2.2.3 Unterschiede zwischen integrierten pn- und Schottky-Dioden .....	15
1.3 Modell für eine Diode .....	15
1.3.1 Statisches Verhalten .....	15
1.3.1.1 Bereich mittlerer Durchlassströme .....	16
1.3.1.2 Weitere Effekte .....	16
1.3.1.3 Bahnwiderstand .....	18
1.3.2 Dynamisches Verhalten .....	18
1.3.2.1 Sperrschichtkapazität .....	19
1.3.2.2 Diffusionskapazität .....	19
1.3.3 Vollständiges Modell einer Diode .....	20
1.3.4 Kleinsignalmodell .....	21
1.3.4.1 Statisches Kleinsignalmodell .....	21
1.3.4.2 Dynamisches Kleinsignalmodell .....	23
1.4 Spezielle Dioden und ihre Anwendung .....	24
1.4.1 Z-Diode .....	24
1.4.1.1 Kennlinie im Durchbruchbereich .....	24
1.4.1.2 Spannungsstabilisierung mit Z-Diode .....	25

1.4.1.3	Spannungsbegrenzung mit Z-Dioden . . . . .	26
1.4.2	pin-Diode . . . . .	27
1.4.3	Kapazitätsdiode . . . . .	28
1.4.4	Brückengleichrichter . . . . .	30
1.4.5	Mischer . . . . .	31
<b>2.</b>	<b>Bipolartransistor . . . . .</b>	<b>35</b>
2.1	Verhalten eines Bipolartransistors . . . . .	35
2.1.1	Kennlinien . . . . .	36
2.1.1.1	Ausgangskennlinienfeld . . . . .	36
2.1.1.2	Übertragungskennlinienfeld . . . . .	37
2.1.1.3	Eingangskennlinienfeld . . . . .	37
2.1.1.4	Stromverstärkung . . . . .	37
2.1.2	Beschreibung durch Gleichungen . . . . .	37
2.1.2.1	Early-Effekt . . . . .	38
2.1.2.2	Basisstrom und Stromverstärkung . . . . .	38
2.1.2.3	Großsignalgleichungen . . . . .	39
2.1.3	Verlauf der Stromverstärkung . . . . .	39
2.1.3.1	Gummel-Plot . . . . .	39
2.1.3.2	Darstellung des Verlaufs . . . . .	40
2.1.3.3	Bestimmung der Werte . . . . .	41
2.1.4	Arbeitspunkt und Kleinsignalverhalten . . . . .	41
2.1.4.1	Bestimmung des Arbeitspunkts . . . . .	42
2.1.4.2	Kleinsignalgleichungen und Kleinsignalparameter . . . . .	43
2.1.4.3	Kleinsignalersatzschaltbild . . . . .	45
2.1.4.4	Vierpol-Matrizen . . . . .	46
2.1.4.5	Gültigkeitsbereich der Kleinsignalbetrachtung . . . . .	46
2.1.5	Grenzdaten und Sperrströme . . . . .	47
2.1.5.1	Durchbruchspannungen . . . . .	47
2.1.5.2	Durchbruch 2. Art . . . . .	49
2.1.5.3	Grenzströme . . . . .	49
2.1.5.4	Sperrströme . . . . .	49
2.1.5.5	Maximale Verlustleistung . . . . .	49
2.1.5.6	Zulässiger Betriebsbereich . . . . .	50
2.1.6	Thermisches Verhalten . . . . .	51
2.1.6.1	Thermisches Ersatzschaltbild . . . . .	52
2.1.6.2	Thermisches Verhalten bei statischem Betrieb . . . . .	53
2.1.6.3	Thermisches Verhalten bei Pulsbetrieb . . . . .	54
2.1.7	Temperaturabhängigkeit der Transistorparameter . . . . .	55
2.2	Aufbau eines Bipolartransistors . . . . .	57
2.2.1	Einzeltransistoren . . . . .	57
2.2.1.1	Innerer Aufbau . . . . .	57
2.2.1.2	Gehäuse . . . . .	57
2.2.1.3	Komplementäre Transistoren . . . . .	59
2.2.2	Integrierte Transistoren . . . . .	59
2.2.2.1	Innerer Aufbau . . . . .	59
2.3	Modelle für den Bipolartransistor . . . . .	60
2.3.1	Statisches Verhalten . . . . .	60

---

2.3.1.1	Das Ebers-Moll-Modell	60
2.3.1.2	Das Transportmodell	63
2.3.1.3	Weitere Effekte	65
2.3.1.4	Stromverstärkung bei Normalbetrieb	68
2.3.1.5	Substrat-Dioden	69
2.3.1.6	Bahnwiderstände	69
2.3.2	Dynamisches Verhalten	71
2.3.2.1	Sperrschichtkapazitäten	71
2.3.2.2	Diffusionskapazitäten	73
2.3.2.3	Gummel-Poon-Modell	74
2.3.3	Kleinsignalmodell	78
2.3.3.1	Statisches Kleinsignalmodell	78
2.3.3.2	Dynamisches Kleinsignalmodell	80
2.3.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	81
2.3.3.4	Zusammenfassung der Kleinsignalparameter	85
2.3.4	Rauschen	85
2.3.4.1	Rauschdichten	85
2.3.4.2	Rauschquellen eines Bipolartransistors	88
2.3.4.3	Äquivalente Rauschquellen	88
2.3.4.4	Ersatzrauschquelle und Rauschzahl	91
2.3.4.5	Rauschzahl eines Bipolartransistors	92
2.3.4.6	Bestimmung des Basisbahnwiderstands	101
2.4	Grundsaltungen	101
2.4.1	Emitterschaltung	102
2.4.1.1	Übertragungskennlinie der Emitterschaltung	102
2.4.1.2	Kleinsignalverhalten der Emitterschaltung	104
2.4.1.3	Nichtlinearität	107
2.4.1.4	Temperaturabhängigkeit	107
2.4.1.5	Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung	108
2.4.1.6	Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung	114
2.4.1.7	Arbeitspunkteinstellung	121
2.4.1.8	Frequenzgang und obere Grenzfrequenz	129
2.4.1.9	Zusammenfassung	136
2.4.2	Kollektorschaltung	138
2.4.2.1	Übertragungskennlinie der Kollektorschaltung	138
2.4.2.2	Kleinsignalverhalten der Kollektorschaltung	140
2.4.2.3	Nichtlinearität	143
2.4.2.4	Temperaturabhängigkeit	144
2.4.2.5	Arbeitspunkteinstellung	144
2.4.2.6	Frequenzgang und obere Grenzfrequenz	147
2.4.2.7	Impedanztransformation mit der Kollektorschaltung	153
2.4.3	Basisschaltung	155
2.4.3.1	Übertragungskennlinie der Basisschaltung	155
2.4.3.2	Kleinsignalverhalten der Basisschaltung	157
2.4.3.3	Nichtlinearität	160
2.4.3.4	Temperaturabhängigkeit	160
2.4.3.5	Arbeitspunkteinstellung	161

2.4.3.6	Frequenzgang und obere Grenzfrequenz .....	163
2.4.4	Darlington-Schaltung .....	166
2.4.4.1	Kennlinien eines Darlington-Transistors .....	168
2.4.4.2	Beschreibung durch Gleichungen .....	169
2.4.4.3	Verlauf der Stromverstärkung .....	170
2.4.4.4	Kleinsignalverhalten .....	172
2.4.4.5	Schaltverhalten .....	174
<b>3.</b>	<b>Feldeffekttransistor .....</b>	<b>177</b>
3.1	Verhalten eines Feldeffekttransistors .....	178
3.1.1	Kennlinien .....	180
3.1.1.1	Ausgangskennlinienfeld .....	180
3.1.1.2	Abschnürbereich .....	180
3.1.1.3	Übertragungskennlinienfeld .....	182
3.1.1.4	Eingangskennlinien .....	182
3.1.2	Beschreibung durch Gleichungen .....	183
3.1.2.1	Verlauf der Kennlinien .....	184
3.1.2.2	Steilheitskoeffizient .....	185
3.1.2.3	Alternative Darstellung .....	186
3.1.2.4	Kanallängenmodulation .....	186
3.1.3	Feldeffekttransistor als steuerbarer Widerstand .....	187
3.1.4	Arbeitspunkt und Kleinsignalverhalten .....	189
3.1.4.1	Arbeitspunkt .....	189
3.1.4.2	Kleinsignalgleichungen und Kleinsignalparameter ...	190
3.1.4.3	Kleinsignalersatzschaltbild .....	192
3.1.4.4	Vierpol-Matrizen .....	192
3.1.4.5	Gültigkeitsbereich der Kleinsignalbetrachtung .....	192
3.1.5	Grenzdaten und Sperrströme .....	193
3.1.5.1	Durchbruchspannungen .....	193
3.1.5.2	Grenzströme .....	195
3.1.5.3	Sperrströme .....	195
3.1.5.4	Maximale Verlustleistung .....	196
3.1.5.5	Zulässiger Betriebsbereich .....	197
3.1.6	Thermisches Verhalten .....	197
3.1.7	Temperaturabhängigkeit der Fet-Parameter .....	197
3.1.7.1	Mosfet .....	197
3.1.7.2	Sperrschicht-Fet .....	199
3.2	Aufbau eines Feldeffekttransistors .....	199
3.2.1	Integrierte Mosfets .....	199
3.2.1.1	Aufbau .....	199
3.2.1.2	CMOS .....	200
3.2.1.3	Bulk-Dioden .....	200
3.2.1.4	Latch-up .....	201
3.2.1.5	Mosfets für höhere Spannungen .....	201
3.2.2	Einzel-Mosfets .....	202
3.2.2.1	Aufbau .....	202
3.2.2.2	Parasitäre Elemente .....	203
3.2.2.3	Kennlinien von vertikalen Leistungs-Mosfets .....	204

---

3.2.3	Sperrschicht-Fets	204
3.2.4	Gehäuse	205
3.3	Modelle für den Feldeffekttransistor	205
3.3.1	Statisches Verhalten	205
3.3.1.1	Level-1-Mosfet-Modell	206
3.3.1.2	Bahnwiderstände	211
3.3.1.3	Vertikale Leistungs-Mosfets	211
3.3.1.4	Sperrschicht-Fets	213
3.3.2	Dynamisches Verhalten	214
3.3.2.1	Kanalkapazitäten	214
3.3.2.2	Überlappungskapazitäten	216
3.3.2.3	Sperrschichtkapazitäten	217
3.3.2.4	Level-1-Mosfet-Modell	218
3.3.2.5	Einzel-Mosfets	219
3.3.2.6	Sperrschicht-Fet-Modell	221
3.3.3	Kleinsignalmodell	221
3.3.3.1	Statisches Kleinsignalmodell im Abschnürbereich	223
3.3.3.2	Dynamisches Kleinsignalmodell im Abschnürbereich	225
3.3.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	227
3.3.3.4	Zusammenfassung der Kleinsignalparameter	229
3.3.4	Rauschen	230
3.3.4.1	Rauschquellen eines Feldeffekttransistors	230
3.3.4.2	Äquivalente Rauschquellen	232
3.3.4.3	Ersatzrauschquelle und Rauschzahl	234
3.3.4.4	Rauschzahl eines Fets	235
3.3.4.5	Vergleich der Rauschzahlen von Fet und Bipolartransistor	238
3.4	Grundsaltungen	238
3.4.1	Sourceschaltung	239
3.4.1.1	Übertragungskennlinie der Sourceschaltung	240
3.4.1.2	Kleinsignalverhalten der Sourceschaltung	241
3.4.1.3	Nichtlinearität	242
3.4.1.4	Temperaturabhängigkeit	243
3.4.1.5	Sourceschaltung mit Stromgegenkopplung	243
3.4.1.6	Sourceschaltung mit Spannungsgegenkopplung	248
3.4.1.7	Arbeitspunkteinstellung	252
3.4.1.8	Frequenzgang und Grenzfrequenz	254
3.4.1.9	Zusammenfassung	260
3.4.2	Drainschaltung	262
3.4.2.1	Übertragungskennlinie der Drainschaltung	262
3.4.2.2	Kleinsignalverhalten der Drainschaltung	263
3.4.2.3	Nichtlinearität	265
3.4.2.4	Temperaturabhängigkeit	265
3.4.2.5	Arbeitspunkteinstellung	266
3.4.2.6	Frequenzgang und Grenzfrequenz	266
3.4.3	Gateschaltung	271
3.4.3.1	Übertragungskennlinie der Gateschaltung	271

3.4.3.2	Kleinsignalverhalten der Gateschaltung	273
3.4.3.3	Nichtlinearität	275
3.4.3.4	Temperaturabhängigkeit	275
3.4.3.5	Arbeitspunkteinstellung	275
3.4.3.6	Frequenzgang und Grenzfrequenz	276
<b>4.</b>	<b>Verstärker</b>	<b>279</b>
4.1	Schaltungen	281
4.1.1	Grundlagen	281
4.1.1.1	Kennlinien der Transistoren	281
4.1.1.2	Skalierung	282
4.1.1.3	Normierung	282
4.1.1.4	Komplementäre Transistoren	283
4.1.1.5	Auswirkung fertigungsbedingter Toleranzen	284
4.1.1.6	Dioden	285
4.1.2	Stromquellen und Stromspiegel	287
4.1.2.1	Prinzip einer Stromquelle	287
4.1.2.2	Einfache Stromquellen für diskrete Schaltungen	290
4.1.2.3	Einfacher Stromspiegel	292
4.1.2.4	Stromspiegel mit Kaskode	304
4.1.2.5	Kaskode-Stromspiegel	308
4.1.2.6	Wilson-Stromspiegel	314
4.1.2.7	Dynamisches Verhalten	316
4.1.2.8	Weitere Stromspiegel und Stromquellen	317
4.1.2.9	Stromspiegel für diskrete Schaltungen	324
4.1.3	Kaskodeschaltung	325
4.1.3.1	Kleinsignalverhalten der Kaskodeschaltung	326
4.1.3.2	Frequenzgang und Grenzfrequenz der Kaskodeschaltung	330
4.1.4	Differenzverstärker	339
4.1.4.1	Grundsaltung	339
4.1.4.2	Gleichtakt- und Differenzverstärkung	340
4.1.4.3	Eigenschaften des Differenzverstärkers	342
4.1.4.4	Unsymmetrischer Betrieb	342
4.1.4.5	Übertragungskennlinien des npn-Differenzverstärkers	343
4.1.4.6	Übertragungskennlinien des n-Kanal-Differenzverstärkers	349
4.1.4.7	Differenzverstärker mit aktiver Last	353
4.1.4.8	Offsetspannung eines Differenzverstärkers	355
4.1.4.9	Kleinsignalverhalten des Differenzverstärkers	357
4.1.4.10	Nichtlinearität	372
4.1.4.11	Arbeitspunkteinstellung	375
4.1.4.12	Frequenzgänge und Grenzfrequenzen des Differenzverstärkers	383
4.1.4.13	Zusammenfassung	398
4.1.5	Impedanzwandler	399
4.1.5.1	Einstufige Impedanzwandler	399
4.1.5.2	Mehrstufige Impedanzwandler	400

	4.1.5.3	Komplementäre Impedanzwandler .....	404
4.1.6		Schaltungen zur Arbeitspunkteinstellung .....	410
	4.1.6.1	UBE-Referenzstromquelle .....	410
	4.1.6.2	PTAT-Referenzstromquelle .....	414
	4.1.6.3	Temperaturunabhängige Referenzstromquelle .....	420
	4.1.6.4	Referenzstromquellen in MOS-Schaltungen .....	421
	4.1.6.5	Arbeitspunkteinstellung in integrierten Verstärkerschaltungen .....	422
4.2		Eigenschaften und Kenngrößen .....	424
	4.2.1	Kennlinien .....	424
	4.2.2	Kleinsignal-Kenngrößen .....	427
	4.2.2.1	Arbeitspunkt .....	427
	4.2.2.2	Kleinsignalgrößen .....	427
	4.2.2.3	Linearisierung .....	428
	4.2.2.4	Kleinsignal-Kenngrößen .....	428
	4.2.2.5	Kleinsignalersatzschaltbild eines Verstärkers .....	429
	4.2.2.6	Verstärker mit Rückwirkung .....	431
	4.2.2.7	Berechnung mit Hilfe des Kleinsignalersatzschalt- bilds der Schaltung .....	434
	4.2.2.8	Reihenschaltung von Verstärkern .....	436
	4.2.3	Nichtlineare Kenngrößen .....	441
	4.2.3.1	Reihenentwicklung der Kennlinie im Arbeitspunkt ...	441
	4.2.3.2	Gültigkeitsbereich der Reihenentwicklung .....	444
	4.2.3.3	Ausgangssignal bei sinusförmiger Ansteuerung .....	444
	4.2.3.4	Klirrfaktor .....	448
	4.2.3.5	Kompressionspunkt .....	450
	4.2.3.6	Intermodulation und Intercept-Punkte .....	451
	4.2.3.7	Reihenschaltung von Verstärkern .....	456
	4.2.3.8	Betriebsfälle bei der Ermittlung der nichtlinearen Kenngrößen .....	459
	4.2.3.9	Messung der nichtlinearen Kenngrößen .....	460
	4.2.4	Rauschen .....	462
	4.2.4.1	Rauschquellen und Rauschdichten eines Verstärkers ..	462
	4.2.4.2	Ersatzrauschquelle und spektrale Rauschzahl .....	463
	4.2.4.3	Optimale Rauschzahl und optimaler Quellenwiderstand	466
	4.2.4.4	Rauschzahl einer Reihenschaltung von Verstärkern ...	469
	4.2.4.5	Signal-Rausch-Abstand und mittlere Rauschzahl .....	473
	4.2.4.6	Optimierung der Rauschzahl .....	482
	4.2.4.7	Rauschanpassung .....	490
	4.2.4.8	Äquivalente Rauschquellen der Grundsaltungen ...	491
<b>5.</b>		<b>Operationsverstärker .....</b>	<b>509</b>
	5.1	Übersicht .....	509
	5.1.1	Operationsverstärker-Typen .....	511
	5.1.2	Prinzip der Gegenkopplung .....	513
	5.1.2.1	Der nichtinvertierende Verstärker .....	514
	5.1.2.2	Der invertierende Verstärker .....	516
	5.2	Der normale Operationsverstärker (VV-OPV) .....	518



5.2.1	Das Prinzip .....	519
5.2.2	Universalverstärker .....	521
5.2.3	Betriebsspannungen .....	523
5.2.4	Single-Supply-Verstärker .....	525
5.2.4.1	Phasenumkehr .....	526
5.2.5	Rail-to-Rail-Verstärker .....	527
5.2.6	Breitband-Operationsverstärker .....	531
5.2.7	Frequenzgang-Korrektur .....	536
5.2.7.1	Grundlagen .....	536
5.2.7.2	Universelle Frequenzgang-Korrektur .....	539
5.2.7.3	Pole-Splitting .....	540
5.2.7.4	Angepasste Frequenzgangkorrektur .....	541
5.2.7.5	Slew-Rate .....	542
5.2.7.6	Kapazitive Last .....	545
5.2.7.7	Interne Lastkorrektur .....	548
5.2.7.8	Zweipolige Frequenzgangkorrektur .....	549
5.2.8	Parameter von Operationsverstärkern .....	550
5.2.8.1	Differenz- und Gleichtaktverstärkung .....	551
5.2.8.2	Offsetspannung .....	554
5.2.8.3	Eingangsströme .....	556
5.2.8.4	Eingangswiderstände .....	558
5.2.8.5	Ausgangswiderstand .....	559
5.2.8.6	Beispiel für statische Fehler .....	560
5.2.8.7	Bandbreite .....	562
5.2.8.8	Rauschen .....	564
5.3	Der Transkonduktanz-Verstärker (VC-OPV) .....	568
5.3.1	Innerer Aufbau .....	568
5.3.2	Typische Anwendung .....	571
5.4	Der Transimpedanzverstärker (CV-OPV) .....	572
5.4.1	Innerer Aufbau .....	572
5.4.2	Frequenzverhalten .....	575
5.4.3	Typische Anwendungen .....	579
5.5	Der Strom-Verstärker (CC-OPV) .....	580
5.5.1	Innerer Aufbau .....	580
5.5.2	Typische Anwendung .....	582
5.5.2.1	Anwendungen mit Stromgegenkopplung .....	582
5.5.2.2	Anwendungen mit Spannungsgegenkopplung .....	586
5.6	Spannungsfolger, Buffer .....	589
5.6.1	Open-Loop-Buffer .....	590
5.6.2	Closed-Loop-Buffer .....	591
5.7	Vergleich .....	593
5.7.1	Praktischer Einsatz .....	598
5.7.1.1	Abblocken der Betriebsspannungen .....	598
5.7.1.2	Schwingneigung .....	598
5.7.1.3	Dämpfung .....	599
5.7.1.4	Gegenkopplungswiderstände .....	599
5.7.1.5	Verlustleistung .....	600

5.7.1.6	Kühlung	600
5.7.1.7	Übersteuerung	600
5.7.1.8	Eingangsschutz	600
5.7.2	Typen	600
5.7.2.1	Universaltypen	602
5.7.2.2	Präzisionstypen	602
5.7.2.3	Rauscharme Typen	602
5.7.2.4	Rail-to-Rail-Output Verstärker	602
5.7.2.5	Rail-to-Rail-IO Verstärker	603
5.7.2.6	Hohe Bandbreite	603
5.7.2.7	Differentieller Ausgang	603
5.7.2.8	Hohe Ausgangsspannung	603
5.7.2.9	Hoher Ausgangsstrom	604
5.7.2.10	CV-Operationsverstärker	604
5.7.2.11	VC-Operationsverstärker	604
5.7.2.12	CC-Operationsverstärker	604
5.7.2.13	Klassifizierung	604
<b>6.</b>	<b>Digitaltechnik Grundlagen</b>	<b>617</b>
6.1	Die logischen Grundfunktionen	617
6.2	Aufstellung logischer Funktionen	619
6.2.1	Das Karnaugh-Diagramm	621
6.3	Abgeleitete Grundfunktionen	624
6.4	Schaltungstechnische Realisierung der Grundfunktionen	625
6.4.1	Statische und dynamische Daten	625
6.4.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL)	627
6.4.2.1	Open-Collector-Ausgänge	628
6.4.2.2	Tristate-Ausgänge	629
6.4.3	Komplementäre MOS-Logik (CMOS)	630
6.4.3.1	CMOS-Inverter	630
6.4.3.2	Offene Eingänge	631
6.4.3.3	Statische Ladungen	632
6.4.3.4	CMOS-Gatter	633
6.4.3.5	Transmission-Gate	633
6.4.4	Emittergekoppelte Logik (ECL)	635
6.4.4.1	PECL-Gatter	635
6.4.4.2	NECL-Gatter	636
6.4.4.3	Wired-OR-Verknüpfung	637
6.4.4.4	Schaltzeiten	637
6.4.4.5	Verlustleistung	638
6.4.5	Current Mode Logik (CML)	638
6.4.5.1	CML-Gatter	639
6.4.5.2	CML-Flip-Flop	641
6.4.6	Low Voltage Differential Signaling (LVDS)	641
6.4.7	Vergleich der Logikfamilien	643
6.5	Verbindungsleitungen	644
6.6	Hazards	646
6.7	Kopplung von Logikfamilien	647

6.8	Betriebsspannungen .....	648
<b>7.</b>	<b>Schaltnetze (Kombinatorische Logik) .....</b>	<b>651</b>
7.1	Multiplexer .....	652
7.1.1	1-aus-n-Decoder .....	653
7.1.2	Demultiplexer .....	653
7.1.3	Multiplexer .....	654
7.2	Schiebelogik (Barrel Shifter) .....	656
7.3	Prioritätsdecoder .....	657
7.4	Kombinatorischer Zähler .....	658
7.5	Paritätsgenerator .....	658
7.6	Komparatoren .....	659
7.7	Zahlendarstellung .....	661
7.7.1	Positive ganze Zahlen im Dualcode .....	661
7.7.1.1	Oktalcode .....	661
7.7.1.2	Hexadezimalcode .....	661
7.7.2	BCD-Code .....	662
7.7.3	Ganze Dualzahlen mit beliebigem Vorzeichen .....	662
7.7.3.1	Darstellung nach Betrag und Vorzeichen .....	662
7.7.3.2	Darstellung im Zweierkomplement (Two's Complement) .....	663
7.7.3.3	Vorzeichenergänzung (Sign Extension) .....	664
7.7.3.4	Offset-Dual-Darstellung (Offset Binary) .....	664
7.7.4	Festkomma-Dualzahlen .....	665
7.7.5	Gleitkomma-Dualzahlen .....	665
7.8	Addierer .....	668
7.8.1	Halbaddierer .....	668
7.8.2	Volladdierer .....	669
7.8.3	Parallele Übertragslogik .....	669
7.8.4	Subtraktion .....	671
7.8.5	Zweierkomplement-Überlauf .....	672
7.8.6	Addition und Subtraktion von Gleitkomma-Zahlen .....	673
7.9	Multiplizierer .....	673
7.9.1	Multiplikation von Festkomma-Zahlen .....	673
7.9.2	Multiplikation von Gleitkomma-Zahlen .....	675
<b>8.</b>	<b>Schaltwerke (Sequentielle Logik) .....</b>	<b>677</b>
8.1	Flip-Flops .....	677
8.1.1	Transparente Flip-Flops .....	678
8.1.1.1	Flip-Flop Grundschaltung .....	678
8.1.1.2	Taktzustandgesteuerte RS-Flip-Flops .....	679
8.1.1.3	Taktzustandgesteuerte D-Flip-Flops .....	679
8.1.2	Flip-Flops mit Zwischenspeicherung .....	680
8.1.2.1	JK Master-Slave Flip-Flops .....	681
8.1.2.2	D Master-Slave Flip-Flops .....	682
8.1.3	Zeitverhalten von Flip-Flops .....	683
8.1.3.1	Vergleich JK- und D-Flip-Flops .....	683
8.1.3.2	Metastabilität .....	684
8.1.4	Flip-Flops für Zähler .....	686

8.2	Dualzähler .....	688
8.2.1	Asynchroner Dualzähler .....	689
8.2.2	Synchrone Dualzähler .....	690
8.2.3	Vorwärts-Rückwärts-Zähler .....	692
8.2.3.1	Zähler mit umschaltbarer Zählrichtung .....	692
8.2.3.2	Zähler mit Vorwärts- und Rückwärts-Eingängen .....	693
8.3	Synchrone BCD-Zähler .....	693
8.4	Vorwahlzähler .....	694
8.5	Schieberegister .....	696
8.5.1	Grundschtaltung .....	696
8.5.2	Schieberegister mit Paralleleingabe .....	696
8.5.3	Erzeugung von Pseudozufallsfolgen .....	698
8.6	Aufbereitung asynchroner Signale .....	700
8.6.1	Entprellung mechanischer Kontakte .....	700
8.6.2	Flankengetriggertes RS-Flip-Flop .....	701
8.6.3	Synchronisation von asynchronen Daten .....	702
8.6.4	Synchroner Zeitschalter .....	702
8.6.5	Synchroner Änderungsdetektor .....	704
8.6.6	Synchroner Taktschalter .....	704
8.7	Systematischer Entwurf von Schaltwerken .....	704
8.7.1	Zustandsdiagramm .....	705
8.7.2	Entwurfsbeispiel für einen Dualzähler .....	706
8.7.3	Entwurfsbeispiel für einen umschaltbaren Zähler .....	707
<b>9.</b>	<b>Halbleiterspeicher .....</b>	<b>711</b>
9.1	Programmierbare Logik .....	711
9.1.1	Programmierbare Logische Bauelemente (PLDs) .....	711
9.1.1.1	Typenübersicht .....	714
9.1.2	Anwender-programmierbare Gate-Arrays .....	715
9.1.2.1	Typenübersicht .....	717
9.1.3	Computer-gestützter PLD-Entwurf .....	718
9.2	Datenspeicher .....	719
9.2.1	Statische RAMs .....	722
9.2.1.1	Zeitbedingungen .....	722
9.2.2	Dynamische RAMs .....	723
9.2.3	Flash Speicher .....	728
9.3	Fehler-Erkennung und -Korrektur .....	730
9.3.1	Paritätsbit .....	730
9.3.2	Hamming-Code .....	731
9.4	First-In-First-Out Memories (FIFO) .....	733
9.4.1	Prinzip .....	733
9.4.2	Standart FIFOs .....	734
9.4.3	FIFO-Realisierung mit Standard-RAMs .....	735
<b>Teil II. Anwendungen</b>		
<b>10.</b>	<b>Analogrechenschaltungen .....</b>	<b>739</b>
10.1	Addierer .....	739
10.2	Subtrahierer .....	740

10.2.1	Rückführung auf die Addition	740
10.2.2	Subtrahierer mit einem Operationsverstärker	741
10.3	Bipolares Koeffizientenglied	743
10.4	Integratoren	744
10.4.1	Invertierender Integrator	744
10.4.2	Anfangsbedingung	747
10.4.3	Summationsintegrator	748
10.4.4	Nicht invertierender Integrator	748
10.4.5	Integrator für hohe Frequenzen	749
10.5	Differentiatoren	751
10.5.1	Prinzipschaltung	751
10.5.2	Praktische Realisierung	751
10.5.3	Differentiator mit hohem Eingangswiderstand	752
10.6	Lösung von Differentialgleichungen	753
10.7	Funktionsnetzwerke	755
10.7.1	Logarithmus	755
10.7.2	Exponentialfunktion	758
10.7.3	Bildung von Potenzfunktionen über Logarithmen	760
10.8	Analog-Multiplizierer	761
10.8.1	Multiplizierer mit logarithmierenden Funktionsgeneratoren	761
10.8.2	Steilheitsmultiplizierer	762
<b>11.</b>	<b>Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter</b>	<b>767</b>
11.1	Spannungsgesteuerte Spannungsquellen	767
11.1.1	Ideale Spannungsquelle	768
11.1.2	Spannungsquelle mit negativem Ausgangswiderstand	769
11.2	Stromgesteuerte Spannungsquellen	770
11.3	Spannungsgesteuerte Stromquellen	771
11.3.1	Stromquellen für potentialfreie Verbraucher	771
11.3.2	Stromquellen für geerdete Verbraucher	773
11.3.3	Transistor-Präzisionsstromquellen	774
11.3.3.1	Transistor-Stromquellen für bipolare Ausgangsströme	776
11.3.4	Schwimmende Stromquellen	779
11.4	Stromgesteuerte Stromquellen	780
11.5	Der NIC (Negative Impedance Converter)	781
11.6	Der Gyrator	783
11.6.1	Transformation von Zweipolen	784
11.6.2	Transformation von Vierpolen	785
11.7	Der Zirkulator	786
<b>12.</b>	<b>Aktive Filter</b>	<b>789</b>
12.1	Theoretische Grundlagen von Tiefpassfiltern	789
12.1.1	Passive Tiefpässe 1. Ordnung	789
12.1.1.1	Beschreibung im Frequenzbereich	789
12.1.1.2	Beschreibung im Zeitbereich	792
12.1.2	Vergleich von Tiefpassfiltern	794
12.1.3	Filter mit kritischer Dämpfung	799
12.1.4	Butterworth-Tiefpässe	800
12.1.5	Tschebyscheff-Tiefpässe	801

12.1.6	Bessel-Tiefpässe .....	804
12.1.7	Zusammenfassung der Theorie .....	805
12.2	Simulation von Filtern .....	813
12.3	Tiefpass-Hochpass-Transformation .....	815
12.4	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 1. Ordnung .....	815
12.5	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 2. Ordnung .....	817
12.5.1	LRC-Filter .....	817
12.5.2	Filter mit Mehrfachgegenkopplung .....	817
12.5.3	Tiefpassfilter mit Einfachmitkopplung .....	819
12.5.4	Hochpassfilter mit Einfachmitkopplung .....	821
12.6	Realisierung von Tiefpassfiltern höherer Ordnung .....	822
12.7	Tiefpass-Bandpass-Transformation .....	826
12.7.1	Bandpassfilter 2. Ordnung .....	827
12.7.2	Bandpassfilter 4. Ordnung .....	829
12.8	Realisierung von Bandpassfiltern 2. Ordnung .....	832
12.8.1	RC-Filter .....	832
12.8.2	LRC-Filter .....	832
12.8.3	Bandpass mit Mehrfachgegenkopplung .....	833
12.8.4	Bandpass mit Einfachmitkopplung .....	834
12.9	Tiefpass-Bandsperren-Transformation .....	835
12.10	Realisierung von Bandsperren 2. Ordnung .....	837
12.10.1	LRC-Sperrfilter .....	837
12.10.2	Bandsperre aus Hoch- und Tiefpass .....	838
12.10.3	Bandsperre mit Bandpass .....	838
12.10.4	Bandsperre als inverser Bandpass .....	839
12.11	Allpässe .....	839
12.11.1	Grundlagen .....	839
12.11.2	Realisierung von Allpässen 1. Ordnung .....	843
12.11.3	Realisierung von Allpässen 2. Ordnung .....	844
12.12	Integratorfilter .....	845
12.12.1	Grundschialtung .....	846
12.12.2	Integratorfilter mit zusätzlichem Hochpass-Ausgang .....	847
12.12.3	Integratorfilter mit zusätzlichem Bandsperren-Ausgang .....	848
12.12.4	Elektronische Steuerung der Filterparameter .....	849
12.12.5	Filter mit einstellbaren Koeffizienten .....	851
12.12.6	Integratorfilter mit VC- und CC-Operationsverstärkern .....	853
12.13	Switched-Capacitor-Filter .....	856
12.13.1	Grundprinzip .....	856
12.13.2	Der SC-Integrator .....	856
12.13.3	SC-Filter 1. Ordnung .....	857
12.13.4	SC-Filter 2. Ordnung .....	858
12.13.5	Allgemeine Gesichtspunkte beim Einsatz von SC-Filtern .....	859
12.14	Vergleich der Übertragungsfunktionen .....	860
12.15	Realisierung von Filtern .....	861
<b>13. Regler</b>	.....	<b>863</b>
13.1	Grundlagen .....	863
13.1.1	Komponenten eines Regelkreises .....	864

13.1.2	Beispielstrecke .....	865
13.2	Regler-Typen .....	866
13.2.1	P-Regler .....	867
13.2.2	PI-Regler .....	868
13.2.3	PID-Regler .....	870
13.2.4	Kompensator .....	873
13.2.5	Realisierung der Regler .....	875
13.3	Regelung nichtlinearer Strecken .....	878
13.3.1	Statische Nichtlinearität .....	878
13.3.2	Dynamische Nichtlinearität .....	880
<b>14.</b>	<b>Signalgeneratoren .....</b>	<b>883</b>
14.1	Rechteckformung .....	883
14.1.1	Komparator .....	883
14.1.1.1	Fensterkomparator .....	885
14.1.2	Schmitt-Trigger .....	885
14.2	Impulserzeugung .....	887
14.2.1	Erzeugung kurzer Impulse .....	887
14.2.2	Erzeugung längerer Impulse .....	888
14.3	Rechteckgeneratoren .....	890
14.3.1	Funktionsgeneratoren .....	890
14.3.2	Einfache Rechteckgeneratoren .....	893
14.3.2.1	Timer als Schmitt-Trigger .....	893
14.3.2.2	Operationsverstärker als Schmitt-Trigger .....	894
14.3.2.3	Gatter als Schmitt-Trigger .....	895
14.3.3	Rechteckgeneratoren mit hoher Frequenzgenauigkeit .....	896
14.4	Sinusschwingungen .....	896
14.4.1	Arbiträrgenerator .....	896
14.4.2	Direkte Digitale Synthese .....	897
<b>15.</b>	<b>Leistungsverstärker .....</b>	<b>899</b>
15.1	Emitterfolger als Leistungsverstärker .....	899
15.2	Komplementäre Emitterfolger .....	901
15.2.1	Komplementäre Emitterfolger in B-Betrieb .....	901
15.2.2	Komplementäre Emitterfolger in AB-Betrieb .....	903
15.3	Komplementäre Darlington-Schaltungen .....	905
15.4	Komplementäre Drainschaltungen .....	906
15.5	Komplementäre Sourceschaltungen .....	907
15.6	Strombegrenzung .....	909
15.6.0.1	Spannungsabhängige Strombegrenzung .....	910
15.7	Vier-Quadranten-Betrieb .....	911
15.8	Dimensionierung einer Leistungsendstufe .....	912
15.9	Ansteuerschaltungen mit Spannungsverstärkung .....	914
15.9.1	Breitband-Ansteuerschaltung .....	915
15.10	Erhöhung der Ausgangsleistung integrierter Operationsverstärker .....	917
15.11	Eine Betriebsspannung .....	918
15.11.1	Wechselspannungskopplung .....	919
15.11.2	Brückenschaltung .....	919
15.12	Getaktete Leistungsverstärker .....	921

<b>16. Stromversorgung</b> .....	<b>927</b>
16.1 Eigenschaften von Netztransformatoren .....	929
16.2 Netzgleichrichter .....	930
16.2.1 Einweggleichrichter .....	930
16.2.2 Brückengleichrichter .....	931
16.2.3 Mittelpunkt-Schaltung .....	935
16.2.3.1 Grundschtaltung .....	935
16.2.3.2 Doppelte Mittelpunktschaltung .....	936
16.3 Lineare Spannungsregler .....	936
16.3.1 Prinzipien .....	937
16.3.2 Praktische Ausführung .....	938
16.3.3 Einstellung der Ausgangsspannung .....	939
16.3.4 Spannungsregler mit geringem Spannungsverlust .....	940
16.3.5 Spannungsregler für negative Spannungen .....	941
16.3.6 Labornetzgeräte .....	942
16.3.7 Integrierte Spannungsregler .....	943
16.4 Erzeugung der Referenzspannung .....	944
16.4.1 Referenzspannungsquellen mit Z-Dioden .....	944
16.4.2 Bandabstands-Referenz .....	946
16.4.3 Typenübersicht .....	948
16.5 Schaltregler ohne Potentialtrennung .....	949
16.5.1 Der Abwärts-Wandler .....	951
16.5.1.1 Prinzip .....	951
16.5.1.2 Ausführungsbeispiel .....	953
16.5.1.3 Leistungsschalter .....	954
16.5.1.4 Pulsbreitenmodulation .....	956
16.5.1.5 Pulsfrequenzmodulation .....	960
16.5.2 Aufwärts-Wandler .....	961
16.5.3 Invertierender Wandler .....	962
16.5.4 Aufwärts- Abwärtswandler .....	963
16.5.5 Sepic Konverter .....	964
16.5.6 Spannungswandler mit Ladungspumpe .....	966
16.5.7 Typenübersicht .....	968
16.6 Schaltregler mit Potentialtrennung .....	969
16.6.1 Eintakt-Wandler .....	969
16.6.1.1 Eintakt-Sperrwandler .....	969
16.6.1.2 Eintakt-Durchflusswandler .....	972
16.6.2 Gegentakt-Wandler .....	974
16.6.2.1 Gegentakt-Wandler mit Parallelspeisung .....	974
16.6.2.2 Gegentakt-Wandler in Halbbrückenschaltung .....	975
16.6.2.3 Gegentakt-Wandler in Brückenschaltung .....	977
16.6.3 Resonanzumrichter .....	980
16.6.4 Aktive Gleichrichtung .....	980
16.6.5 Leistungsschalter .....	983
16.6.5.1 Leistungstransistoren .....	983
16.6.5.2 Gatetreiber ohne Potentialtrennung .....	987
16.6.5.3 Gatetreiber mit Potentialtrennung .....	990



16.6.6	Integrierte Gatetreiber	993
16.6.7	Hochfrequenztransformatoren	994
16.6.8	Verlustanalyse	996
16.7	Leistungsfaktorkorrektur	997
16.8	Solarwechselrichter	1000
16.9	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	1004
16.10	Stromversorgung mit Akkus	1005
16.10.1	Akkutechnologien	1005
16.10.2	Entladung	1006
16.10.3	Ladung	1006
16.10.4	Ladegerät	1008
<b>17.</b>	<b>DA- und AD-Umsetzer</b>	<b>1013</b>
17.1	Systemtheoretische Grundlagen	1014
17.1.1	Quantisierung der Zeit	1014
17.1.1.1	Abtasttheorem	1014
17.1.1.2	Rückgewinnung des Analogsignals	1016
17.1.1.3	Praktische Gesichtspunkte	1016
17.1.2	Quantisierung der Amplitude	1019
17.1.3	Spannungseinheit	1020
17.2	Digital-Analog Umsetzung	1020
17.2.1	Grundprinzipien der DA-Umsetzung	1020
17.2.2	Wägeverfahren mit geschalteten Spannungen	1021
17.2.2.1	Einsatz von Wechselschaltern	1022
17.2.2.2	Leiternetzwerk	1023
17.2.2.3	Inversbetrieb eines Leiternetzwerks	1024
17.2.3	Wägeverfahren mit geschalteten Strömen	1025
17.2.4	DA-Umsetzer für spezielle Anwendungen	1026
17.2.4.1	Verarbeitung vorzeichenbehafteter Zahlen	1026
17.2.4.2	Multiplizierende DA-Umsetzer	1028
17.2.4.3	Dividierende DA-Umsetzer	1029
17.2.5	Genauigkeit von DA-Umsetzern	1029
17.2.5.1	Statische Kenngrößen	1029
17.2.5.2	Glitche	1029
17.2.5.3	Typen	1030
17.3	Analog-Digital Umsetzer	1032
17.3.1	Parallelverfahren	1032
17.3.2	Pipelineumsetzer	1035
17.3.3	Wägeverfahren	1038
17.3.4	Zählverfahren	1041
17.3.4.1	Modifiziertes Wägeverfahren	1041
17.3.4.2	Dual-Slope-Verfahren	1042
17.3.5	Überabtastung	1044
17.3.6	Delta-Sigma-Verfahren	1045
17.3.7	Genauigkeit von AD-Umsetzern	1050
17.3.7.1	Statische Fehler	1050
17.3.7.2	Dynamische Fehler	1051
17.3.7.3	Vergleich der Verfahren	1052

17.4	Abtast-Halte-Glieder .....	1053
17.4.1	Grundlagen .....	1053
17.4.2	Transmission-Gate als Schalter .....	1055
17.4.3	Dioden-Brücke als Schalter .....	1056
<b>18.</b>	<b>Messschaltungen .....</b>	<b>1059</b>
18.1	Spannungsmessung .....	1059
18.1.1	Impedanzwandler .....	1059
18.1.1.1	Vergrößerung der Spannungssteuerbarkeit .....	1059
18.1.2	Messung von Potentialdifferenzen .....	1060
18.1.2.1	Subtrahierer mit beschalteten Operationsverstärkern ..	1060
18.1.2.2	Subtrahierer für hohe Spannungen .....	1062
18.1.2.3	Subtrahierer mit gegengekoppelten Differenzverstärkern .....	1063
18.1.2.4	Subtrahierer in SC-Technik .....	1064
18.1.3	Trennverstärker (Isolation Amplifier) .....	1065
18.2	Strommessung .....	1068
18.2.1	Strommessung mit Shunts .....	1068
18.2.2	Potentialfreies Amperemeter mit niedrigem Spannungsabfall ..	1071
18.2.3	Strommessung auf hohem Potential .....	1072
18.2.4	Strommessung über das Magnetfeld .....	1072
18.3	Messgleichrichter (AC/DC-Converter) .....	1075
18.3.1	Messung des Betragsmittelwertes .....	1075
18.3.1.1	Vollweggleichrichter mit geerdetem Ausgang .....	1076
18.3.1.2	Gleichrichtung durch Umschalten des Vorzeichens ...	1077
18.3.1.3	Breitband-Vollweggleichrichter .....	1078
18.3.2	Messung des Effektivwertes .....	1079
18.3.2.1	Echte Effektivwertmessung (True RMS) .....	1080
18.3.2.2	Leistungsmesser .....	1082
18.3.3	Messung des Scheitelwertes .....	1083
18.3.3.1	Momentane Scheitelwertmessung .....	1085
18.3.4	Synchrone Gleichrichter .....	1086
<b>19.</b>	<b>Sensorik .....</b>	<b>1091</b>
19.1	Temperaturmessung .....	1091
19.1.1	Kaltleiter auf Silizium-Basis, PTC-Sensoren .....	1094
19.1.2	Metalle als Kaltleiter, PTC-Sensoren .....	1098
19.1.3	Heißeleiter, NTC-Sensoren .....	1099
19.1.4	Transistor als Temperatursensor .....	1100
19.1.5	Das Thermoelement .....	1103
19.1.6	Typenübersicht .....	1108
19.2	Druckmessung .....	1108
19.2.1	Aufbau von Drucksensoren .....	1109
19.2.2	Betrieb temperaturkompensierter Drucksensoren .....	1110
19.2.3	Temperaturkompensation von Drucksensoren .....	1113
19.2.4	Handelsübliche Drucksensoren .....	1114
19.3	Feuchtemessung .....	1115
19.3.1	Feuchtesensoren .....	1116
19.3.2	Betriebsschaltungen für kapazitive Feuchtesensoren .....	1116

19.4	Drehwinkelkodierer .....	1118
19.5	Übertragung von Sensorsignalen .....	1122
19.5.1	Galvanisch gekoppelte Signalübertragung .....	1122
19.5.2	Galvanisch getrennte Signalübertragung .....	1125
19.6	Kalibrierung von Sensorsignalen .....	1126
19.6.1	Kalibrierung des Analogsignals .....	1127
19.6.2	Computer-gestützte Kalibrierung .....	1130
<b>20.</b>	<b>Optoelektronische Bauelemente .....</b>	<b>1135</b>
20.1	Fotometrische Grundbegriffe .....	1135
20.2	Leuchtdioden .....	1138
20.3	Fotodiode .....	1140
20.3.1	Fotozellen als Empfänger .....	1141
20.3.2	Fotozellen zur Energiegewinnung .....	1142
20.4	Fototransistor .....	1143
20.5	Optokoppler .....	1143
20.6	Optische Anzeige .....	1144
20.6.1	Flüssigkristallanzeigen .....	1144
20.6.2	Binär-Anzeige .....	1145
20.6.3	Analog-Anzeige .....	1147
20.6.4	Numerische Anzeige .....	1148
20.6.5	Multiplex Anzeige .....	1150
20.6.6	Alpha-Numerische Anzeige .....	1151
20.6.6.1	16-Segment-Anzeigen .....	1151
20.6.6.2	35-Punktmatrix-Anzeigen .....	1152
<b>Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik</b>		
<b>21.</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>1159</b>
21.1	Nachrichtentechnische Systeme .....	1159
21.2	Übertragungskanäle .....	1162
21.2.1	Leitung .....	1162
21.2.1.1	Feldwellenwiderstand und Ausbreitungsgeschwindigkeit .....	1163
21.2.1.2	Leitungswellenwiderstand .....	1163
21.2.1.3	Leitungsgleichung .....	1164
21.2.1.4	Dämpfung .....	1167
21.2.1.5	Kenngößen einer Leitung .....	1168
21.2.1.6	Vierpoldarstellung einer Leitung .....	1169
21.2.1.7	Leitung mit Abschluss .....	1170
21.2.1.8	Streifenleitung .....	1172
21.2.2	Drahtlose Verbindung .....	1173
21.2.2.1	Antennen .....	1173
21.2.2.2	Leistungsübertragung über eine drahtlose Verbindung .....	1176
21.2.2.3	Frequenzbereiche .....	1177
21.2.3	Faseroptische Verbindung .....	1178
21.2.3.1	Lichtwellenleiter .....	1179
21.2.3.2	Wellenlängenbereiche .....	1182
21.2.4	Vergleich der Übertragungskanäle .....	1183

---

21.3	Reflexionsfaktor und S-Parameter	1184
21.3.1	Wellengrößen	1184
21.3.1.1	Darstellung mit Hilfe von Spannung und Strom	1185
21.3.2	Reflexionsfaktor	1186
21.3.2.1	Reflexionsfaktor-Ebene ( $r$ -Ebene)	1186
21.3.2.2	Einfluss einer Leitung auf den Reflexionsfaktor	1187
21.3.2.3	Stehwellenverhältnis	1189
21.3.3	Wellenquelle	1192
21.3.3.1	Unabhängige Welle einer Wellenquelle	1192
21.3.3.2	Verfügbare Leistung	1192
21.3.4	S-Parameter	1193
21.3.4.1	S-Matrix	1193
21.3.4.2	Messung der S-Parameter	1196
21.3.4.3	Zusammenhang mit den Y-Parametern	1196
21.3.4.4	S-Parameter eines Transistors	1196
21.3.4.5	Ortskurven	1198
21.4	Modulationsverfahren	1200
21.4.1	Amplitudenmodulation	1204
21.4.1.1	Darstellung im Zeitbereich	1205
21.4.1.2	Darstellung im Frequenzbereich	1207
21.4.1.3	Modulation	1208
21.4.1.4	Demodulation	1209
21.4.2	Frequenzmodulation	1212
21.4.2.1	Darstellung im Zeitbereich	1213
21.4.2.2	Darstellung im Frequenzbereich	1214
21.4.2.3	Modulation	1217
21.4.2.4	Demodulation	1217
21.4.3	Digitale Modulationsverfahren	1220
21.4.3.1	Einfache Tastverfahren	1220
21.4.3.2	I/Q-Darstellung digitaler Modulationsverfahren	1223
21.4.3.3	Impulsformung	1230
21.4.3.4	Ein einfacher QPSK-Modulator	1235
21.5	Mehrfachnutzung und Gruppierung von Kanälen	1238
21.5.1	Multiplex-Verfahren	1238
21.5.1.1	Frequenzmultiplex	1238
21.5.1.2	Zeitmultiplex	1239
21.5.1.3	Codemultiplex	1240
21.5.2	Duplex-Verfahren	1246
21.5.2.1	Frequenzduplex	1246
21.5.2.2	Zeitduplex	1246
<b>22.</b>	<b>Sender und Empfänger</b>	<b>1249</b>
22.1	Sender	1249
22.1.1	Sender mit analoger Modulation	1249
22.1.1.1	Sender mit direkter Modulation	1249
22.1.1.2	Sender mit einer Zwischenfrequenz	1249
22.1.1.3	Sender mit zwei Zwischenfrequenzen	1252
22.1.1.4	Sender mit variabler Sendefrequenz	1254

22.1.2	Sender mit digitaler Modulation .....	1254
22.1.3	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen .....	1255
22.2	Empfänger .....	1257
22.2.1	Geradeausempfänger .....	1257
22.2.2	Überlagerungsempfänger .....	1258
22.2.2.1	HF-Filter .....	1259
22.2.2.2	Vorverstärker .....	1260
22.2.2.3	Vorselektion .....	1261
22.2.2.4	ZF-Filter .....	1261
22.2.2.5	Überlagerungsempfänger mit zwei Zwischenfrequenzen .....	1262
22.2.2.6	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen .....	1263
22.2.3	Verstärkungsregelung .....	1264
22.2.3.1	Regelverhalten .....	1265
22.2.3.2	Regelbarer Verstärker (VGA) .....	1267
22.2.3.3	Anordnung der Verstärkungsregelung im Empfänger ..	1269
22.2.3.4	Pegeldetektion .....	1269
22.2.3.5	Digitale Verstärkungsregelung .....	1270
22.2.4	Dynamikbereich eines Empfängers .....	1271
22.2.4.1	Rauschzahl des Empfängers .....	1273
22.2.4.2	Minimaler Empfangspegel .....	1274
22.2.4.3	Maximaler Empfangspegel .....	1275
22.2.4.4	Dynamikbereich .....	1276
22.2.5	Empfänger für digitale Modulationsverfahren .....	1281
22.2.5.1	Empfänger mit digitalen Kanalfiltern .....	1283
22.2.5.2	Empfänger mit ZF-Abtastung und digitalen Kanalfiltern .....	1288
22.2.5.3	Vergleich der Empfänger für digitale Modulationsverfahren .....	1292
22.2.5.4	Direktumsetzender Empfänger .....	1293
<b>23. Passive Komponenten</b>	.....	<b>1299</b>
23.1	Hochfrequenz-Ersatzschaltbilder .....	1299
23.1.1	Widerstand .....	1300
23.1.2	Spule .....	1301
23.1.3	Kondensator .....	1304
23.2	Filter .....	1305
23.2.1	LC-Filter .....	1306
23.2.1.1	Zweikreisiges Bandfilter .....	1306
23.2.1.2	Filter mit Leitungen .....	1311
23.2.2	Dielektrische Filter .....	1312
23.2.3	SAW-Filter .....	1314
23.3	Schaltungen zur Impedanztransformation .....	1316
23.3.1	Anpassung .....	1317
23.3.1.1	Anpassnetzwerke mit zwei Elementen .....	1317
23.3.1.2	Collins-Filter .....	1321
23.3.1.3	Anpassung mit Streifenleitungen .....	1322
23.3.2	Ankopplung .....	1327

	23.3.2.1 Ankopplung mit kapazitivem Spannungsteiler . . . . .	1328
	23.3.2.2 Ankopplung mit induktivem Spannungsteiler . . . . .	1329
	23.3.2.3 Ankopplung mit festgekoppeltem induktivem Spannungsteiler . . . . .	1329
23.4	Leistungsteiler und Hybride . . . . .	1329
23.4.1	Leistungsteiler . . . . .	1331
	23.4.1.1 Verlustbehaftete Leistungsteiler mit Widerständen . . .	1331
	23.4.1.2 Wilkinson-Teiler . . . . .	1331
23.4.2	Hybride . . . . .	1332
	23.4.2.1 S-Parameter eines Hybrids . . . . .	1332
	23.4.2.2 Hybride mit Spulen und Kondensatoren . . . . .	1334
	23.4.2.3 Hybride mit Leitungen . . . . .	1334
<b>24.</b>	<b>Hochfrequenz-Verstärker . . . . .</b>	<b>1337</b>
24.1	Integrierte Hochfrequenz-Verstärker . . . . .	1337
24.1.1	Anpassung . . . . .	1339
	24.1.1.1 Eingangsseitige Anpassung . . . . .	1339
	24.1.1.2 Ausgangsseitige Anpassung . . . . .	1340
24.1.2	Rauschzahl . . . . .	1341
24.1.3	Entwurf rauscharmer integrierter HF-Verstärker (LNA) . . . . .	1343
	24.1.3.1 Ohmsche Gegenkopplung bei niedrigen Frequenzen . .	1344
	24.1.3.2 Gegenkopplung bei hohen Frequenzen . . . . .	1350
24.2	HF-Verstärker mit Einzeltransistoren . . . . .	1360
24.2.1	Verallgemeinerter Einzeltransistor . . . . .	1361
24.2.2	Arbeitspunkteinstellung . . . . .	1362
	24.2.2.1 Gleichstromgegenkopplung . . . . .	1362
	24.2.2.2 Gleichspannungsgegenkopplung . . . . .	1364
	24.2.2.3 Arbeitspunktregelung . . . . .	1364
24.2.3	Anpassung einstufiger Verstärker . . . . .	1365
	24.2.3.1 Bedingungen für die Anpassung . . . . .	1365
	24.2.3.2 Reflexionsfaktoren des Transistors . . . . .	1366
	24.2.3.3 Berechnung der Anpassung . . . . .	1367
	24.2.3.4 Stabilität bei der Betriebsfrequenz . . . . .	1367
	24.2.3.5 Berechnung der Anpassnetzwerke . . . . .	1368
	24.2.3.6 Stabilität im ganzen Frequenzbereich . . . . .	1368
	24.2.3.7 Leistungsverstärkung . . . . .	1368
24.2.4	Anpassung mehrstufiger Verstärker . . . . .	1373
	24.2.4.1 Anpassung mit Serien-Induktivität . . . . .	1374
24.2.5	Neutralisation . . . . .	1374
	24.2.5.1 Schaltungen zur Neutralisation . . . . .	1374
	24.2.5.2 Leistungsverstärkung bei Neutralisation . . . . .	1374
24.2.6	Besondere Schaltungen zur Verbesserung der Anpassung . . . . .	1377
	24.2.6.1 Anpassung mit Zirkulatoren . . . . .	1377
	24.2.6.2 Anpassung mit Hybriden . . . . .	1379
24.2.7	Rauschen . . . . .	1380
	24.2.7.1 Rauschparameter und Rauschzahl . . . . .	1380
	24.2.7.2 Entwurf eines rauscharmen Verstärkers . . . . .	1380
24.3	Breitband-Verstärker . . . . .	1383

24.3.1	Prinzip eines Breitband-Verstärkers	1383
24.3.2	Ausführung eines Breitband-Verstärkers	1385
24.4	Kenngrößen von Hochfrequenz-Verstärkern	1389
24.4.1	Leistungsverstärkung	1389
24.4.1.1	Klemmenleistungsgewinn	1390
24.4.1.2	Einfügungsgewinn	1391
24.4.1.3	Übertragungsgewinn	1391
24.4.1.4	Verfügbare Leistungsgewinn	1392
24.4.1.5	Vergleich der Gewinn-Definitionen	1393
24.4.1.6	Gewinn bei beidseitiger Anpassung	1393
24.4.1.7	Maximaler Leistungsgewinn bei Transistoren	1394
24.4.2	Nichtlineare Kenngrößen	1396
24.4.2.1	Betriebsbedingungen	1397
24.4.2.2	Kennlinien eines Hochfrequenz-Verstärkers	1397
24.4.2.3	Kleinsignalverstärkung	1399
24.4.2.4	Kompressionspunkt	1400
24.4.2.5	Intermodulation	1401
<b>25. Mischer</b>		<b>1403</b>
25.1	Funktionsprinzip eines idealen Mixers	1403
25.1.1	Aufwärtsmischer	1404
25.1.2	Abwärtsmischer	1404
25.1.3	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1407
25.2	Funktionsprinzipien bei praktischen Mixern	1409
25.2.1	Additive Mischung	1409
25.2.1.1	Gleichungsmäßige Beschreibung	1409
25.2.1.2	Nichtlinearität	1410
25.2.1.3	Praktische Ausführung	1413
25.2.1.4	Einsatz additiver Mixer	1418
25.2.2	Multiplikative Mischung	1418
25.2.2.1	Gleichungsmäßige Beschreibung	1418
25.2.2.2	Schaltverhalten der Schalter	1421
25.2.2.3	Nichtlinearität	1422
25.2.2.4	Praktische Ausführung	1422
25.3	Mischer mit Dioden	1422
25.3.1	Eintaktmischer	1423
25.3.1.1	LO-Kreis	1425
25.3.1.2	Kleinsignalersatzschaltbild	1427
25.3.1.3	Kleinsignalverhalten	1428
25.3.1.4	Mischverstärkung	1430
25.3.1.5	Mischgewinn	1431
25.3.1.6	Vergleich mit idealem Schalter	1433
25.3.1.7	Nachteile des Eintaktmischers	1434
25.3.2	Gegentaktmischer	1434
25.3.2.1	LO-Kreis	1436
25.3.2.2	Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1436
25.3.2.3	Vor- und Nachteile des Gegentaktmischers	1437
25.3.3	Ringmischer	1438

	25.3.3.1 LO-Kreis . . . . .	1439
	25.3.3.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten .	1441
25.3.4	Breitbandiger Betrieb . . . . .	1443
	25.3.4.1 Kleinsignalverhalten . . . . .	1444
	25.3.4.2 Anpassung . . . . .	1446
	25.3.4.3 Mischgewinn . . . . .	1447
	25.3.4.4 Allgemeiner Fall . . . . .	1449
	25.3.4.5 Vergleich von Schmalband- und Breitbandbetrieb . . . .	1455
25.3.5	Kenngrößen . . . . .	1455
25.3.6	Rauschen . . . . .	1456
	25.3.6.1 Verfahren zur Berechnung der Rauschzahl . . . . .	1457
	25.3.6.2 Näherungen für Schmalband- und Breitbandbetrieb . .	1459
25.3.7	Praktische Diodenmischer . . . . .	1461
25.4	Passive Mischer mit Feldeffekttransistoren . . . . .	1463
25.4.1	Eintaktmischer . . . . .	1464
	25.4.1.1 LO-Kreis . . . . .	1464
	25.4.1.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten .	1470
	25.4.1.3 Nachteile des Eintaktmischers . . . . .	1473
25.4.2	Gegentaktmischer . . . . .	1474
25.4.3	Ringmischer . . . . .	1477
25.4.4	Integrierte Fet-Mischer . . . . .	1478
25.4.5	Eigenschaften von passiven Fet-Mischern . . . . .	1481
	25.4.5.1 Frequenzbereich . . . . .	1481
	25.4.5.2 LO-Leistung . . . . .	1481
	25.4.5.3 Nichtlinearität . . . . .	1481
	25.4.5.4 Rauschen . . . . .	1481
25.5	Aktive Mischer mit Transistoren . . . . .	1482
25.5.1	Gegentaktmischer . . . . .	1482
	25.5.1.1 Berechnung des Übertragungsverhaltens . . . . .	1483
	25.5.1.2 Rechteckförmige LO-Spannung . . . . .	1484
	25.5.1.3 Sinusförmige LO-Spannung . . . . .	1485
	25.5.1.4 Kleinsignalverhalten . . . . .	1486
	25.5.1.5 Mischverstärkung . . . . .	1487
	25.5.1.6 Bandbreite . . . . .	1487
	25.5.1.7 Anpassung . . . . .	1488
	25.5.1.8 Mischgewinn . . . . .	1489
	25.5.1.9 Praktische Ausführung . . . . .	1491
	25.5.1.10Gegentaktmischer mit Übertragern . . . . .	1493
	25.5.1.11Nachteil des Gegentaktmischers mit Transistoren . . . .	1495
25.5.2	Doppel-Gegentaktmischer (Gilbert-Mischer) . . . . .	1495
	25.5.2.1 Berechnung des Übertragungsverhaltens . . . . .	1497
	25.5.2.2 Kleinsignalverhalten . . . . .	1499
	25.5.2.3 Mischverstärkung . . . . .	1500
	25.5.2.4 Bandbreite . . . . .	1501
	25.5.2.5 Doppel-Gegentaktmischer in integrierten Schaltungen	1501
	25.5.2.6 Anpassung . . . . .	1502
	25.5.2.7 Mischgewinn . . . . .	1504



25.5.2.8	I/Q-Mischer mit Doppel-Gegentaktmischern	1506
25.5.3	Kenngrößen	1507
25.5.4	Rauschen	1507
25.6	Vergleich aktiver und passiver Mischer	1510
25.6.1	Rauschzahl, Intercept-Punkt und Dynamikbereich	1510
25.6.2	Bandbreite	1511
25.6.3	LO-Leistung	1512
25.7	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1512
25.7.1	Phasenschieber	1513
25.7.1.1	RC-Phasenschieber	1513
25.7.1.2	RC-Polyphasen-Filter	1513
25.7.1.3	Hybride als Phasenschieber	1515
25.7.2	Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1516
<b>26. Oszillatoren</b>		<b>1519</b>
26.1	LC-Oszillatoren	1520
26.1.1	LC-Resonanzkreise	1520
26.1.2	Verstärker mit selektiver Mitkopplung	1523
26.1.2.1	Mitkopplung mit Parallelschwingkreis	1524
26.1.2.2	Mitkopplung mit Serienschwingkreis	1525
26.1.2.3	Vergleich der Schaltungen	1525
26.1.3	Schleifenverstärkung	1525
26.1.3.1	Berechnung bei Verstärkern ohne Rückwirkung	1525
26.1.3.2	Berechnung bei Verstärkern mit Rückwirkung	1527
26.1.3.3	Güte der Schleifenverstärkung	1529
26.1.3.4	Übertragungsfunktion und Zeitsignale	1530
26.1.3.5	Schleifenverstärkung bei Übersteuerung	1532
26.1.3.6	Negative Widerstände	1533
26.1.4	LC-Oszillatoren mit zweistufigen Verstärkern	1534
26.1.4.1	Zweistufiger LC-Oszillator mit Parallelschwingkreis	1534
26.1.4.2	Zweistufiger Oszillator mit Serienschwingkreis	1538
26.1.4.3	Zusammenfassung der wichtigen Punkte	1540
26.1.5	LC-Oszillatoren mit einstufigen Verstärkern	1541
26.1.5.1	Colpitts-Oszillator in Basisschaltung	1542
26.1.5.2	Colpitts-Oszillator in Kollektorschaltung	1547
26.1.5.3	Colpitts-Oszillator in Emitterschaltung	1553
26.1.5.4	Colpitts-Oszillator mit CMOS-Inverter	1554
26.1.5.5	Colpitts-Oszillator mit Differenzverstärker	1555
26.1.5.6	Eigenschaften integrierter und diskreter Colpitts-Oszillatoren	1557
26.1.5.7	Hartley-Oszillatoren	1559
26.1.5.8	Gegentaktoszillatoren	1560
26.1.5.9	Weitere Oszillatoren	1566
26.2	Oszillatoren mit Leitungen	1568
26.2.1	Leitungsresonatoren	1569
26.2.1.1	Ersatzschaltbild	1569
26.2.1.2	Betriebsbedingungen	1569
26.2.1.3	Berechnung der Elemente	1569

	26.2.1.4 Praktische Leitungsresonatoren .....	1571
	26.2.1.5 Leitungsparameter .....	1575
26.2.2	Schaltungen .....	1577
	26.2.2.1 Oszillatoren mit Leitungsresonatoren .....	1577
	26.2.2.2 Oszillatoren mit dielektrischen Resonatoren .....	1581
26.3	Quarz-Oszillatoren .....	1581
26.3.1	Quarz-Resonatoren .....	1582
	26.3.1.1 Ersatzschaltbild .....	1583
	26.3.1.2 Impedanz und Resonanzfrequenzen .....	1583
	26.3.1.3 Frequenzabgleich .....	1586
	26.3.1.4 Verlustleistung .....	1588
	26.3.1.5 Temperaturverhalten .....	1589
26.3.2	Schaltungen .....	1589
	26.3.2.1 Taktoszillatoren .....	1590
	26.3.2.2 Referenzoszillatoren .....	1593
26.3.3	Alternative Resonatoren .....	1599
	26.3.3.1 Keramische Resonatoren .....	1599
	26.3.3.2 Oberflächenwellen-Resonatoren .....	1599
26.4	Frequenzabstimmung .....	1601
26.4.1	Varaktoren .....	1602
	26.4.1.1 Bipolare Varaktoren .....	1602
	26.4.1.2 MOS-Varaktoren .....	1602
	26.4.1.3 Kleinsignalmodell .....	1603
26.4.2	Abstimmung .....	1604
	26.4.2.1 Abstimmung eines Parallelschwingkreises .....	1604
	26.4.2.2 Kennlinie .....	1609
	26.4.2.3 Abstimmung eines Serienschwingkreises .....	1611
	26.4.2.4 Breitband-Abstimmung .....	1611
	26.4.2.5 Aussteuerung .....	1614
	26.4.2.6 Modulation .....	1615
26.5	Amplitudenregelung .....	1616
26.5.1	Regelung und Begrenzung .....	1616
26.5.2	Regelmechanismen .....	1617
	26.5.2.1 Regelung über den Ruhestrom .....	1617
	26.5.2.2 Regelung mit Stromteiler .....	1618
26.5.3	Amplitudenmessung .....	1619
26.6	Phasenrauschen .....	1621
26.6.1	Darstellung im Zeit- und im Frequenzbereich .....	1621
	26.6.1.1 Zeitbereich .....	1621
	26.6.1.2 Frequenzbereich .....	1623
26.6.2	Entstehung .....	1626
	26.6.2.1 Linearer Anteil .....	1627
	26.6.2.2 Modulations- und Konversionsanteil .....	1630
26.6.3	Frequenzteilung und Frequenzvervielfachung .....	1631
26.6.4	Betrieb mit einer Phasenregelschleife .....	1633
26.6.5	Vergleich verschiedener Oszillatoren .....	1635
<b>27.</b>	<b>Phasenregelschleife (PLL) .....</b>	<b>1637</b>

27.1	Anwendungen .....	1638
27.1.1	Frequenzsynthese (Synthesizer) .....	1638
27.1.2	Träger-/Takt-Regeneration (Synchronizer) .....	1638
27.1.3	Phasen-/Frequenz-Demodulation (Demodulator) .....	1640
27.2	Analoge PLL .....	1641
27.2.1	Komponenten .....	1641
27.2.2	Kennlinie des Mischers als Phasendetektor .....	1642
27.2.3	Phasendetektor-Konstante des Mischers .....	1644
27.2.4	Arbeitspunkt des Mischers .....	1645
27.2.5	Kennlinie des VCOs .....	1645
27.2.6	VCO-Konstante .....	1646
27.2.7	Arbeitspunkt der PLL .....	1646
27.2.8	Regelungstechnisches Kleinsignalersatzschaltbild .....	1647
27.2.9	Übertragungsfunktionen .....	1648
27.2.10	Schleifenbandbreite .....	1649
27.2.11	Wahl der Schleifenbandbreite .....	1650
27.2.12	Dimensionierung der Beispielschaltung .....	1650
27.2.13	Verhalten der PLL .....	1651
27.2.14	Phasenregelung .....	1654
27.2.15	Übertragungsfunktionen mit PI-Regler .....	1654
27.2.16	Dimensionierung mit PI-Regler .....	1656
27.2.17	Verhalten der analogen PLL mit PI-Regler .....	1661
27.2.18	Zusammenfassung .....	1663
27.3	Digitale PLL .....	1664
27.3.1	Digitale PLL mit EXOR-Phasendetektor .....	1665
27.3.2	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Stromausgang .....	1668
27.3.3	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Spannungsausgang .....	1669
27.3.4	Sequentielle Phasendetektoren .....	1671
27.3.4.1	Flankengetriggelter Phasendetektor .....	1671
27.3.4.2	Phasen-Frequenz-Detektor .....	1672
27.3.5	Störtöne .....	1678
27.3.6	Beispiel für eine digitale PLL mit Phasen-Frequenz-Detektor ..	1679
27.3.6.1	Kennlinien und Konstanten .....	1679
27.3.6.2	Dimensionierung des Schleifenfilters .....	1680
27.3.6.3	Verhalten .....	1683
27.3.7	Digitale PLL mit Frequenzteilern .....	1686
27.3.7.1	Blockschaltbild und Kleinsignalersatzschaltbild .....	1686
27.3.7.2	Kanalwahl und Teilerfaktorsteuerung .....	1686
27.3.7.3	Momentanwerte und Mittelwerte .....	1687
27.3.8	Integer-N-PLL .....	1687
27.3.9	Fractional-N-PLL .....	1688
27.3.9.1	Steuerbare Frequenzteiler .....	1688
27.3.9.2	Teilerfaktorsteuerung .....	1689
27.4	Rauschen .....	1707
27.4.1	Rauschsignale .....	1708
27.4.2	Übertragungsfunktionen .....	1708
27.4.3	Referenzoszillator und VCO .....	1710

---

27.4.4	Frequenzteiler .....	1713
27.4.5	Phasendetektor .....	1713
27.4.6	Schleifenfilter .....	1714
27.4.7	Minimierung des Phasenrauschens .....	1717
<b>28.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>1719</b>
28.1	PSpice-Kurzanleitung .....	1719
28.1.1	Grundsätzliches .....	1719
28.1.2	Programme und Dateien .....	1719
28.1.2.1	Spice .....	1719
28.1.2.2	PSpice .....	1719
28.1.3	Ein einfaches Beispiel .....	1722
28.1.3.1	Eingabe des Schaltplans .....	1722
28.1.3.2	Simulationsanweisungen eingeben .....	1727
28.1.3.3	Simulation starten .....	1730
28.1.3.4	Anzeigen der Ergebnisse .....	1730
28.1.3.5	Arbeitspunkt anzeigen .....	1735
28.1.3.6	Netzliste und Ausgabedatei .....	1736
28.1.4	Weitere Simulationsbeispiele .....	1738
28.1.4.1	Kennlinien eines Transistors .....	1738
28.1.4.2	Verwendung von Parametern .....	1738
28.1.5	Einbinden weiterer Bibliotheken .....	1742
28.1.6	Einige typische Fehler .....	1744
28.2	Erklärung der verwendeten Größen .....	1746
28.3	Typen der 7400-Logik-Familien .....	1754
28.4	Normwert-Reihen .....	1761
28.5	Farbcode .....	1762
28.6	Hersteller .....	1764
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>1771</b>
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>1775</b>



<http://www.springer.com/978-3-662-48354-1>

Halbleiter-Schaltungstechnik

Tietze, U.; Schenk, C.; Gamm, E.

2016, XXXVII, 1815 S., Hardcover

ISBN: 978-3-662-48354-1