

Ulrich Tietze • Christoph Schenk • Eberhard Gamm

Halbleiter-Schaltungstechnik

13., neu bearb. Aufl.

4y Springer

Inhaltsübersicht

Teil I. Grundlagen

1. Diode	3
2. Bipolartransistor	35
3. Feldeffekttransistor	177
4. Verstärker	279
5. Operationsverstärker	509
6. Digitaltechnik Grundlagen	613
7. Schaltnetze (Kombinatorische Logik)	647
8. Schaltwerke (Sequentielle Logik)	673
9. Halbleiterspeicher	707

Teil II. Anwendungen

10. Analogrechenschaltungen	739
11. Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter	767
12. Aktive Filter	787
13. Signalgeneratoren	847
14. Leistungsverstärker	863
15. Stromversorgung	889
16. DA- und AD-Umsetzer	963
17. Messschaltungen	1009
18. Sensorik	1037
19. Elektronische Regler	1081
20. Optoelektronische Bauelemente	1105

Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik

21. Grundlagen	1127
22. Sender und Empfänger	1217
23. Passive Komponenten	1267
24. Hochfrequenz-Verstärker	1305
25. Mischer	1371
26. Oszillatoren	1487
27. Anhang	1605
Literaturverzeichnis	1669
Sachverzeichnis	1673

Inhaltsverzeichnis

Teil I. Grundlagen

1. Diode	3
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
2.	Bipolartransistor.	35
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	Durchbruchsspannungen.	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
3.		Feldeffekttransistor	177
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	Durchbruchsspannungen	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
4.	Verstärker	279
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 nph-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	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 Rauschdichtefi eines Verstärkers .. 462	462
4.2.4.2	Ersatzrauschquelle und spektrale Rauschzahl	463
4.2.4.3	Optimale Rauschzahl und optimaler Quellenwiderstand 466	466
4.2.4.4	Rauschzahl einer Reihenschaltung von Verstärkern ... 469	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	491
5.	Operationsverstärker.	509
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	Vergleich	589
5.6.1	Praktischer Einsatz	594
5.6.1.1	Abblocken der Betriebsspannungen	595
5.6.1.2	Schwingneigung	595
5.6.1.3	Dämpfung	595
5.6.1.4	Gegenkopplungswiderstände	596
5.6.1.5	Verlustleistung	596
5.6.1.6	Kühlung	596
5.6.1.7	Übersteuerung	596
5.6.1.8	Eingangsschutz	597

5.6.2	Typen	597
5.6.2.1	Universaltypen	598
5.6.2.2	Präzisionstypen	598
5.6.2.3	Rauscharme Typen	598
5.6.2.4	Rail-to-Rail-Output Verstärker	599
5.6.2.5	Rail-to-Rail-IO Verstärker	599
5.6.2.6	Hohe Bandbreite	599
5.6.2.7	Differentieller Ausgang	600
5.6.2.8	Hohe Ausgangsspannung	600
5.6.2.9	Hoher Ausgangsstrom	600
5.6.2.10	CV-Operationsverstärker	600
5.6.2.11	VC-Operationsverstärker	600
5.6.2.12	CC-Operationsverstärker	601
5.6.2.13	Klassifizierung	601
6.	Digitaltechnik Grundlagen	613
6.1	Die logischen Grundfunktionen	613
6.2	Aufstellung logischer Funktionen	615
6.2.1	Das Karnaugh-Diagramm	617
6.3	Abgeleitete Grundfunktionen	620
6.4	Schaltungstechnische Realisierung der Grundfunktionen	621
6.4.1	Statische und dynamische Daten	621
6.4.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL)	623
6.4.2.1	Open-Collector-Ausgänge	624
6.4.2.2	Tristate-Ausgänge	625
6.4.3	Komplementäre MOS-Logik (CMOS)	626
6.4.3.1	CMOS-Inverter	626
6.4.3.2	Offene Eingänge	627
6.4.3.3	Statische Ladungen	628
6.4.3.4	CMOS-Gatter	629
6.4.3.5	Transmission-Gate	629
6.4.4	Emittergekoppelte Logik (ECL)	631
6.4.4.1	PECL-Gatter	631
6.4.4.2	NECL-Gatter	632
6.4.4.3	Wired-OR- Verknüpfung	633
6.4.4.4	Schaltzeiten	633
6.4.4.5	Verlustleistung	634
6.4.5	Current Mode Logik (CML)	634
6.4.5.1	CML-Gatter	635
6.4.5.2	CML-Flip-Flop	637
6.4.6	Low Voltage Differential Signaling (LVDS)	637
6.4.7	Vergleich der Logikfamilien	639
6.5	Verbindungsleitungen	640
6.6	Hazards	642
6.7	Kopplung von Logikfamilien	643
6.8	Betriebsspannungen	644
7.	Schaltnetze (Kombinatorische Logik)	647
7.1	Multiplexer	648

Inhaltsverzeichnis

7.1.1	1-aus-n-Decoder	648
7.1.2	Demultiplexer	649
7.1.3	Multiplexer	650
7.2	Schiebelogik (Barrel Shifter)	652
7.3	Prioritätsdecoder	653
7.4	Kombinatorischer Zähler	654
7.5	Paritätsgenerator	654
7.6	Komparatoren	655
7.7	Zahlendarstellung	657
7.7.1	Positive ganze Zahlen im Dualcode	657
7.7.1.1	Oktalcode	657
7.7.1.2	Hexadezimalcode	657
7.7.2	BCD-Code	658
7.7.3	Ganze Dualzahlen mit beliebigem Vorzeichen	658
7.7.3.1	Darstellung nach Betrag und Vorzeichen	658
7.7.3.2	Darstellung im Zweierkomplement (Two's Complement)	659
7.7.3.3	Vorzeichenergänzung (Sign Extension)	660
7.7.3.4	Offset-Dual-Darstellung (Offset Binary)	660
7.7.4	Festkomma-Dualzahlen	661
7.7.5	Gleitkomma-Dualzahlen	661
7.8	Addierer	664
7.8.1	Halbaddierer	664
7.8.2	Volladdierer	665
7.8.3	Parallele Übertragslogik	665
7.8.4	Subtraktion	667
7.8.5	Zweierkomplement-Überlauf	668
7.8.6	Addition und Subtraktion von Gleitkomma-Zahlen	669
7.9	Multiplizierer	669
7.9.1	Multiplikation von Festkomma-Zahlen	669
7.9.2	Multiplikation von Gleitkomma-Zahlen	671
8.	Schaltwerke (Sequentielle Logik)	673
8.1	Flip-Flops	673
8.1.1	Transparente Flip-Flops	674
8.1.1.1	Flip-Flop Grundschialtung	674
8.1.1.2	Taktzustandgesteuerte RS-Flip-Flops	675
8.1.1.3	Taktzustandgesteuerte D-Flip-Flops	675
8.1.2	Flip-Flops mit Zwischenspeicherung	676
8.1.2.1	JK Master-Slave Flip-Flops	677
8.1.2.2	D Master-Slave Flip-Flops	678
8.1.3	Zeitverhalten von Flip-Flops	679
8.1.3.1	Vergleich JK- und D-Flip-Flops	679
8.1.3.2	Metastabilität	680
8.1.4	Flip-Flops für Zähler	682
8.2	Dualzähler	684
8.2.1	Asynchroner Dualzähler	685
8.2.2	Synchrone Dualzähler	686

8.2.3	Vorwärts-Rückwärts-Zähler	688
8.2.3.1	Zähler mit umschaltbarer Zählrichtung	688
8.2.3.2	Zähler mit Vorwärts- und Rückwärts-Eingängen	689
8.3	Synchrone BCD-Zähler	689
8.4	Vorwahlzähler	690
8.5	Schieberegister	692
8.5.1	Grundschtaltung	692
8.5.2	Schieberegister mit Parallelingabe	692
8.5.3	Erzeugung von Pseudozufallsfolgen	694
8.6	Aufbereitung asynchroner Signale	696
8.6.1	Entprellung mechanischer Kontakte	696
8.6.2	Flankengetriggertes RS-Flip-Flop	697
8.6.3	Synchronisation von asynchronen Daten	698
8.6.4	Synchroner Zeitschalter	698
8.6.5	Synchroner Änderungsdetektor	700
8.6.6	Synchroner Taktschalter	700
8.7	Systematischer Entwurf von Schaltwerken	701
8.7.1	Zustandsdiagramm	701
8.7.2	Entwurfsbeispiel für einen Dualzähler	702
8.7.3	Entwurfsbeispiel für einen umschaltbaren Zähler	704
9.	Halbleiterspeicher	707
9.1	Programmierbare Logik	707
9.1.1	Programmierbare Logische Bauelemente (PLDs)	707
9.1.1.1	Typenübersicht	710
9.1.2	Anwender-programmierbare Gate-Arrays	712
9.1.2.1	Typenübersicht	713
9.1.3	Computer-gestützter PLD-Entwurf	714
9.2	Datenspeicher	716
9.2.1	Statische RAMs	718
9.2.1.1	Zeitbedingungen	719
9.2.1.2	Beispiele für SRAMs	720
9.2.2	Dynamische RAMs	721
9.2.3	Flash Speicher	726
9.3	Fehler-Erkennung und -Korrektur	728
9.3.1	Paritätsbit	729
9.3.2	Hamming-Code	730
9.4	First-In-First-Out Memories (FIFO)	732
9.4.1	Prinzip	732
9.4.2	Standard FIFOs	733
9.4.3	FIFO-Realisierung mit Standard-RAMs	734
Teil II. Anwendungen		
10.	Analogrechenschaltungen	739
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	760
10.8.1	Multiplizierer mit logarithmierenden Funktionsgeneratoren	760
10.8.2	Steilheitsmultiplizierer	761
11.	Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter	767
11.1	Spannungsgesteuerte Spannungsquellen	767
11.2	Stromgesteuerte Spannungsquellen	769
11.3	Spannungsgesteuerte Stromquellen	770
11.3.1	Stromquellen für potentialfreie Verbraucher	770
11.3.2	Stromquellen für geerdete Verbraucher	772
11.3.3	Transistor-Präzisionsstromquellen	773
11.3.3.1	Transistor-Stromquellen für bipolare Ausgangsströme	775
11.3.4	Schwimmende Stromquellen	778
11.4	Stromgesteuerte Stromquellen	779
11.5	Der NIC (Negative Impedance Converter)	779
11.6	Der Gyrator	782
11.6.1	Transformation von Zweipolen	783
11.6.2	Transformation von Vierpolen	784
11.7	Der Zirkulator	785
12.	Aktive Filter	787
12.1	Theoretische Grundlagen von Tiefpassfiltern	787
12.1.1	Butterworth-Tiefpässe	792
12.1.2	Tschebyscheff-Tiefpässe	794
12.1.3	Bessel-Tiefpässe	797
12.1.4	Zusammenfassung der Theorie	800
12.2	Tiefpass-Hochpass-Transformation	808
12.3	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 1. Ordnung	808
12.4	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 2. Ordnung	810
12.4.1	LRC-Filter	810
12.4.2	Filter mit Mehrfachgegenkopplung	811
12.4.3	Filter mit Einfachmitkopplung	812
12.5	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern höherer Ordnung	814

12.6	Tiefpass-Bandpass-Transformation	816
12.6.1	Bandpassfilter 2. Ordnung	817
12.6.2	Bandpassfilter 4. Ordnung	818
12.7	Realisierung von Bandpassfiltern 2. Ordnung	820
12.7.1	LRC-Filter	821
12.7.2	Bandpass mit Mehrfachgegenkopplung	822
12.7.3	Bandpass mit Einfachmitkopplung	823
12.8	Tiefpass-Bandsperren-Transformation	824
12.9	Realisierung von Sperrfiltern 2. Ordnung	825
12.9.1	LRC-Sperrfilter	825
12.9.2	Aktive Doppel-T-Bandsperre	826
12.9.3	Aktive Wien-Robinson-Bandsperre	826
12.10	Allpässe	827
12.10.1	Grundlagen	827
12.10.2	Realisierung von Allpässen 1. Ordnung	830
12.10.3	Realisierung von Allpässen 2. Ordnung	830
12.11	Integratorfilter	832
12.11.1	Grundschialtung	832
12.11.2	Integratorfilter für hohe Frequenzen	833
12.11.3	Integratorfilter mit zusätzlichem Hochpass-Ausgang	833
12.11.4	Integratorfilter mit zusätzlichem Bandsperren-Ausgang	834
12.11.5	Elektronische Steuerung der Filterparameter	835
12.11.6	Filter mit einstellbaren Koeffizienten	838
12.12	Switched-Capacitor-Filter	840
12.12.1	Grundprinzip	840
12.12.2	Der SC-Integrator	840
12.12.3	SC-Filter 1. Ordnung	841
12.12.4	SC-Filter 2. Ordnung	842
12.12.5	Integrierte Realisierung von SC-Filtern	843
12.12.6	Allgemeine Gesichtspunkte beim Einsatz von SC-Filtern	844
12.12.7	Typenübersicht	844
13.	Signalgeneratoren	847
13.1	Rechteckformung	847
13.1.1	Komparator	847
13.1.1.1	Fensterkomparator	849
13.1.2	Schmitt-Trigger	849
13.2	Impulserzeugung	851
13.2.1	Erzeugung kurzer Impulse	851
13.2.2	Erzeugung längerer Impulse	852
13.3	Rechteckgeneratoren	854
13.3.1	Funktionsgeneratoren	854
13.3.2	Einfache Rechteckgeneratoren	857
13.3.2.1	Timer als Schmitt-Trigger	857
13.3.2.2	Operationsverstärker als Schmitt-Trigger	858
13.3.2.3	Gatter als Schmitt-Trigger	859
13.3.3	Rechteckgeneratoren mit hoher Frequenzgenauigkeit	859
13.4	Sinusschwingungen	860

13.4.1	Arbiträrgenerator	860
13.4.2	Direkte Digitale Synthese	861
14.	Leistungsverstärker	863
14.1	Emitterfolger als LeistungsVerstärker	863
14.2	Komplementäre Emitterfolger	865
14.2.1	Komplementäre Emitterfolger in B-Betrieb	865
14.2.2	Komplementäre Emitterfolger in AB-Betrieb	867
14.2.3	Erzeugung der Vorspannung	869
14.3	Komplementäre Darlington-Schaltungen	869
14.4	Komplementäre Drainschaltungen	870
14.5	Komplementäre Sourceschaltungen	872
14.6	Strombegrenzung	873
14.6.0.1	Spannungsabhängige Strombegrenzung	874
14.7	Vier-Quadranten-Betrieb	875
14.8	Dimensionierung einer Leistungsendstufe	876
14.9	Ansteuerschaltungen mit Spannungsverstärkung	879
14.9.1	Breitband-Ansteuerschaltung	879
14.10	Erhöhung des Ausgangsstromes integrierter Operationsverstärker	881
14.11	Eine Betriebsspannung	882
14.11.1	Wechselspannungskopplung	882
14.11.2	Brückenschaltung	883
14.12	Getaktete Leistungsverstärker	885
15.	Stromversorgung	889
15.1	Eigenschaften von Netztransformatoren	891
15.2	Netzgleichrichter	892
15.2.1	Einweggleichrichter	892
15.2.2	Brückengleichrichter	893
15.2.3	Mittelpunkt-Schaltung	897
15.2.3.1	Grundschialtung	897
15.2.3.2	Doppelte Mittelpunktschaltung	898
15.3	Lineare Spannungsregler	898
15.3.1	Prinzipien	899
15.3.2	Praktische Ausführung	899
15.3.3	Einstellung der Ausgangsspannung...	901
15.3.4	Spannungsregler mit geringem Spannungsverlust	902
15.3.5	Spannungsregler für negative Spannungen	903
15.3.6	Labornetzgeräte	904
15.3.7	Integrierte Spannungsregler	905
15.4	Erzeugung der Referenzspannung	906
15.4.1	Referenzspannungsquellen mit Z-Dioden	906
15.4.2	Bandabstands-Referenz	908
15.4.3	Typenübersicht	910
15.5	Schaltregler ohne Potentialtrennung	911
15.5.1	Der Abwärts-Wandler	913
15.5.1.1	Prinzip	913
15.5.1.2	Ausführungsbeispiel	915
15.5.1.3	Leistungsschalter	916

15.5.1.4	Pulsbreitenmodulation	918
15.5.1.5	Pulsfrequenzmodulation	922
15.5.2	Aufwärts-Wandler	923
15.5.3	Invertierender Wandler	924
15.5.4	Aufwärts- Abwärtswandler	925
15.5.5	Sepie Konverter	926
15.5.6	Spannungswandler mit Ladungspumpe	928
15.5.7	Typenübersicht	930
15.6	Schaltregler mit Potentialtrennung	930
15.6.1	Eintakt-Wandler	932
15.6.1.1	Eintakt-Sperrwandler	932
15.6.1.2	Eintakt-Durchflusswandler	934
15.6.2	Gegentakt-Wandler	936
15.6.2.1	Gegentakt-Wandler mit Parallelspeisung	936
15.6.2.2	Gegentakt-Wandler in Halbbrückenschaltung	937
15.6.2.3	Gegentakt-Wandler in Brückenschaltung	939
15.6.3	Resonanzumrichter	942
15.6.4	Aktive Gleichrichtung	943
15.6.5	Leistungsschalter	945
15.6.5.1	Leistungstransistoren	945
15.6.5.2	Gatetreiber ohne Potentialtrennung	949
15.6.5.3	Gatetreiber mit Potentialtrennung	952
15.6.6	Integrierte Gatetreiber	955
15.6.7	Hochfrequenztransformatoren	956
15.6.8	Verlustanalyse	958
15.7	Leistungsfaktorkorrektur	959
16.	DA- und AD-Umsetzer	963
16.1	Systemtheoretische Grundlagen	964
16.1.1	Quantisierung der Zeit	964
16.1.1.1	Abtasttheorem	964
16.1.1.2	Rückgewinnung des Analogsignals	966
16.1.1.3	Praktische Gesichtspunkte	966
16.1.2	Quantisierung der Amplitude	969
16.1.3	Spannungseinheit	970
16.2	Digital-Analog Umsetzung	970
16.2.1	Grundprinzipien der DA-Umsetzung	970
16.2.2	Wägeverfahren mit geschalteten Spannungen	971
16.2.2.1	Einsatz von Wechselschaltern	972
16.2.2.2	Leiternetzwerk	973
16.2.2.3	Inversbetrieb eines Leiternetzwerks	974
16.2.3	Wägeverfahren mit geschalteten Strömen	975
16.2.4	DA-Umsetzer für spezielle Anwendungen	976
16.2.4.1	Verarbeitung vorzeichenbehafteter Zahlen	976
16.2.4.2	Multiplizierende DA-Umsetzer	978
16.2.4.3	Dividierende DA-Umsetzer	978
16.2.5	Genauigkeit von DA-Umsetzern	979
16.2.5.1	Statische Kenngrößen	979

	16.2.5.2 Dynamische Kenngrößen	979
16.3	Analog-Digital Umsetzer	982
16.3.1	Parallelverfahren	982
16.3.2	Pipelineumsetzer	985
16.3.3	Wägeverfahren	988
16.3.4	Zählverfahren	991
	16.3.4.1 Modifiziertes Wägeverfahren	991
	16.3.4.2 Dual-Slope-Verfahren	992
16.3.5	Überabtastung	994
16.3.6	Delta-Sigma- Verfahren	995
16.3.7	Genauigkeit von AD-Umsetzern	1000
	16.3.7.1 Statische Fehler	1000
	16.3.7.2 Dynamische Fehler	1001
	16.3.7.3 Vergleich der Verfahren	1003
16.4	Abtast-Halte-Glieder	1003
16.4.1	Grundlagen	1003
16.4.2	Transmission-Gate als Schalter	1006
16.4.3	Dioden-Brücke als Schalter	1006
17.	Messschaltungen	1009
17.1	Spannungsmessung	1009
17.1.1	Impedanzwandler	1009
	17.1.1.1 Vergrößerung der Spannungsaussteuerbarkeit	1009
17.1.2	Messung von Potentialdifferenzen	1010
	17.1.2.1 Subtrahierer mit beschalteten Operationsverstärkern	1010
	17.1.2.2 Subtrahierer für hohe Spannungen	1012
	17.1.2.3 Subtrahierer mit gegengekoppelten Differenzverstärkern	1013
	17.1.2.4 Subtrahierer in SC-Technik	1015
17.1.3	Trennverstärker (Isolation Amplifier)	1016
17.2	Strommessung	1019
17.2.1	Potentialfreies Amperemeter mit niedrigem Spannungsabfall	1019
17.2.2	Strommessung auf hohem Potential .../	1020
17.3	Messgleichrichter (AC/DC-Converter)	1020
17.3.1	Messung des Betragsmittelwertes	1020
	17.3.1.1 Vollweggleichrichter mit geerdetem Ausgang	1021
	17.3.1.2 Gleichrichtung durch Umschalten des Vorzeichens	1023
	17.3.1.3 Breitband-Vollweggleichrichter	1023
17.3.2	Messung des Effektivwertes...!	1024
	17.3.2.1 Echte Effektivwertmessung (True RMS)	1025
	17.3.2.2 Thermische Umformung	1027
17.3.3	Messung des Scheitelwertes	1029
	17.3.3.1 Momentane Scheitelwertmessung	1030
17.3.4	Synchrongleichrichter	1031
18.	Sensorik	1037
18.1	Temperaturmessung	1037
18.1.1	Metalle als Kaltleiter	1040
18.1.2	Kaltleiter auf Silizium-Basis, PTC	1040

18.1.3	Heißeleiter, NTC	1041
18.1.4	Betrieb von Widerstandstemperaturfühlern	1041
18.1.5	Transistor als Temperatursensor	1046
18.1.6	Das Thermoelement	1049
18.1.7	Typenübersicht	1055
18.2	Druckmessung	1055
18.2.1	Aufbau von Drucksensoren	1056
18.2.2	Betrieb temperaturkompensierter Drucksensoren	1057
18.2.3	Temperaturkompensation von Drucksensoren	1061
18.2.4	Handelsübliche Drucksensoren	1063
18.3	Feuchtemessung	1064
18.3.1	Feuchtesensoren	1065
18.3.2	Betriebsschaltungen für kapazitive Feuchtesensoren	1066
18.4	Übertragung von Sensorsignalen	1069
18.4.1	Galvanisch gekoppelte Signalübertragung	1069
18.4.2	Galvanisch getrennte Signalübertragung	1072
18.5	Kalibrierung von Sensorsignalen	1073
18.5.1	Kalibrierung des Analogsignals	1073
18.5.2	Computer-gestützte Kalibrierung	1077
19.	Elektronische Regler	1081
19.1	Grundlagen	1081
19.2	Regler-Typen	1082
19.2.1	P-Regler	1082
19.2.2	PI-Regler	1084
19.2.3	PID-Regler	1086
19.2.4	Einstellbarer PID-Regler	1088
19.3	Regelung nichtlinearer Strecken	1090
19.3.1	Statische Nichtlinearität	1090
19.3.2	Dynamische Nichtlinearität	1091
19.4	Nachlaufsynchrosation (PLL)	1092
19.4.1	Abtast-Halte-Glied als Phasendetektor	1094
19.4.1.1	Dynamisches Verhalten	1095
19.4.1.2	Dimensionierung des Reglers	1095
19.4.1.3	Einrastvorgang	1096
19.4.2	Synchrone Gleichrichter als Phasendetektor	1096
19.4.3	Frequenzempfindlicher Phasendetektor	1098
19.4.4	Phasendetektor mit beliebig erweiterbarem Messbereich	1100
19.4.5	PLL als Frequenzvervielfacher	1101
20.	Optoelektronische Bauelemente	1105
20.1	Photometrische Grundbegriffe	1105
20.2	Photowiderstand	1107
20.3	Photodiode	1108
20.4	Phototransistor	1110
20.5	Leuchtdioden	1111
20.6	Optokoppler	1112
20.7	Optische Anzeige	1112
20.7.1	Binär-Anzeige	1113

20.7.2	Analog-Anzeige	1114
20.7.3	Numerische Anzeige	1116
20.7.4	Multiplex Anzeige	1117
20.7.5	Alpha-Numerische Anzeige	1119
20.7.5.1	16-Segment-Anzeigen	1119
20.7.5.2	35-Punktmatrix-Anzeigen	1120

Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik

21. Grundlagen		1127
21.1	Nachrichtentechnische Systeme	1127
21.2	Übertragungskanäle	1130
21.2.1	Leitung	1130
21.2.1.1	Feldwellenwiderstand und Ausbreitungsgeschwindigkeit	1131
21.2.1.2	Leitungswellenwiderstand	1131
21.2.1.3	Leitungsgleichung	1132
21.2.1.4	Dämpfung	1135
21.2.1.5	Kenngrößen einer Leitung	1136
21.2.1.6	Vierpoldarstellung einer Leitung	1137
21.2.1.7	Leitung mit Abschluss	1138
21.2.1.8	Streifenleitung	1140
21.2.2	Drahtlose Verbindung	1141
21.2.2.1	Antennen	1141
21.2.2.2	Leistungsübertragung über eine drahtlose Verbindung	1144
21.2.2.3	Frequenzbereiche	1145
21.2.3	Faseroptische Verbindung	1146
21.2.3.1	Lichtwellenleiter	1147
21.2.3.2	Wellenlängenbereiche	1150
21.2.4	Vergleich der Übertragungskanäle	1151
21.3	Reflexionsfaktor und S-Parameter	1152
21.3.1	Wellengrößen	1152
21.3.1.1	Darstellung mit Hilfe von Spannung und Strom	1153
21.3.2	Reflexionsfaktor	1154
21.3.2.1	Reflexionsfaktor-Ebene (r-Ebene)	1154
21.3.2.2	Einfluss einer Leitung auf den Reflexionsfaktor	1155
21.3.2.3	Stehwellenverhältnis	1157
21.3.3	Wellenquelle	1160
21.3.3.1	Unabhängige Welle einer Wellenquelle	1160
21.3.3.2	Verfügbare Leistung	1160
21.3.4	S-Parameter	1161
21.3.4.1	S-Matrix	1161
21.3.4.2	Messung der S-Parameter	1164
21.3.4.3	Zusammenhang mit den Y-Parametern	1164
21.3.4.4	S-Parameter eines Transistors	1164
21.3.4.5	Ortskurven	1166
21.4	Modulationsverfahren	1168
21.4.1	Amplitudenmodulation	1172

21.4.1.1	Darstellung im Zeitbereich	1173
21.4.1.2	Darstellung im Frequenzbereich	1175
21.4.1.3	Modulation	1176
21.4.1.4	Demodulation	1177
21.4.2	Frequenzmodulation	1180
21.4.2.1	Darstellung im Zeitbereich	1181
21.4.2.2	Darstellung im Frequenzbereich	1182
21.4.2.3	Modulation	1185
21.4.2.4	Demodulation	1185
21.4.3	Digitale Modulationsverfahren	1188
21.4.3.1	Einfache Tastverfahren	1188
21.4.3.2	I/Q-Darstellung digitaler Modulationsverfahren	1191
21.4.3.3	Impulsformung	1198
21.4.3.4	Ein einfacher QPSK-Modulator	1203
21.5	Mehrfachnutzung und Gruppierung von Kanälen	1206
21.5.1	Multiplex-Verfahren	1206
21.5.1.1	Frequenzmultiplex	1206
21.5.1.2	Zeitmultiplex	1207
21.5.1.3	Codemultiplex	1208
21.5.2	Duplex-Verfahren	1214
21.5.2.1	Frequenzduplex	1214
21.5.2.2	Zeitduplex	1214
22.	Sender und Empfänger	1217
22.1	Sender	1217
22.1.1	Sender mit analoger Modulation	1217
22.1.1.1	Sender mit direkter Modulation	1217
22.1.1.2	Sender mit einer Zwischenfrequenz	1217
22.1.1.3	Sender mit zwei Zwischenfrequenzen	1220
22.1.1.4	Sender mit variabler Sendefrequenz	1222
22.1.2	Sender mit digitaler Modulation	1222
22.1.3	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen	1223
22.2	Empfänger	1225
22.2.1	Geradeusempfänger	1225
22.2.2	Überlagerungsempfänger	1226
22.2.2.1	HF-Filter	1227
22.2.2.2	Vorverstärker	1228
22.2.2.3	Vorselektion	1229
22.2.2.4	ZF-Filter	1229
22.2.2.5	Überlagerungsempfänger mit zwei Zwischenfrequenzen	1230
22.2.2.6	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen	1231
22.2.3	Verstärkungsregelung	1232
22.2.3.1	Regelverhalten	1233
22.2.3.2	Regelbarer Verstärker (VGA)	1235
22.2.3.3	Anordnung der Verstärkungsregelung im Empfänger	1237
22.2.3.4	Pegeldetektion	1237
22.2.3.5	Digitale Verstärkungsregelung	1238

Inhaltsverzeichnis

22.2.4	Dynamikbereich eines Empfängers.	1239
22.2.4.1	Rauschzahl des Empfängers.	1241
22.2.4.2	Minimaler Empfangspegel.	1242
22.2.4.3	Maximaler Empfangspegel.	1243
22.2.4.4	Dynamikbereich.	1244
22.2.5	Empfänger für digitale Modulationsverfahren.	1249
22.2.5.1	Empfänger mit digitalen Kanalfiltern.	1251
22.2.5.2	Empfänger mit ZF-Abtastung und digitalen Kanalfiltern.	1256
22.2.5.3	Vergleich der Empfänger für digitale Modulationsverfahren.	1260
22.2.5.4	Direktumsetzender Empfänger.	1261
23.	Passive Komponenten.	1267
23.1	Hochfrequenz-Ersatzschaltbilder.	1267
23.1.1	Widerstand.	1268
23.1.2	Spule.	1269
23.1.3	Kondensator.	1272
23.2	Filter.	1273
23.2.1	LC-Filter.	1274
23.2.1.1	Zweikreisiges Bandfilter.	1274
23.2.1.2	Filter mit Leitungen.	1279
23.2.2	Dielektrische Filter.	1280
23.2.3	SAW-Filter.	1282
23.3	Schaltungen zur Impedanztransformation.	1284
23.3.1	Anpassung.	1285
23.3.1.1	Anpassnetzwerke mit zwei Elementen.	1285
23.3.1.2	Collins-Füter.	1289
23.3.1.3	Anpassung mit Streifenleitungen.	1290
23.3.2	Ankopplung.	1295
23.3.2.1	Ankopplung mit kapazitivem Spannungsteiler.	1296
23.3.2.2	Ankopplung mit induktivem Spannungsteiler.	1297
23.3.2.3	Ankopplung mit festgekoppeltem induktivem Spannungsteiler.	1297
23.4	Leistungsteiler und Hybride.	1297
23.4.1	Leistungsteiler.	1299
23.4.1.1	Verlustbehaftete Leistungsteiler mit Widerständen.	1299
23.4.1.2	Wilkinson-Teiler.	1299
23.4.2	Hybride.	1300
23.4.2.1	S-Parameter eines Hybrids.	1300
23.4.2.2	Hybride mit Spulen und Kondensatoren.	1302
23.4.2.3	Hybride mit Leitungen.	1302
24.	Hochfrequenz-Verstärker.	1305
24.1	Integrierte Hochfrequenz-Verstärker.	1305
24.1.1	Anpassung.	1307
24.1.1.1	Eingangsseitige Anpassung.	1307
24.1.1.2	Ausgangsseitige Anpassung.	1308
24.1.2	Rauschzahl.	1309

24.1.3	Entwurf rau scharmer integrierter HF-Verstärker (LNA)	1311
24.1.3.1	Ohmsche Gegenkopplung bei niedrigen Frequenzen ..	1312
24.1.3.2	Gegenkopplung bei hohen Frequenzen.	1318
24.2	HF-Verstärker mit Einzeltransistoren.	1328
24.2.1	Verallgemeinerter Einzeltransistor.	1329
24.2.2	Arbeitspunkteinstellung	1330
24.2.2.1	Gleichstromgegenkopplung	1330
24.2.2.2	Gleichspannungsgegenkopplung.	1332
24.2.2.3	Arbeitspunktregelung.	1332
24.2.3	Anpassung einstufiger Verstärker.	1333
24.2.3.1	Bedingungen für die Anpassung.	1333
24.2.3.2	Reflexionsfaktoren des Transistors.	1334
24.2.3.3	Berechnung der Anpassung.	1335
24.2.3.4	Stabilität bei der Betriebsfrequenz.	1335
24.2.3.5	Berechnung der Anpassnetzwerke.	1336
24.2.3.6	Stabilität im ganzen Frequenzbereich.	1336
24.2.3.7	Leistungsverstärkung.	1336
24.2.4	Anpassung mehrstufiger Verstärker.	1341
24.2.4.1	Anpassung mit Serien-Induktivität	1342
24.2.5	Neutralisation.	1342
24.2.5.1	Schaltungen zur Neutralisation.	1342
24.2.5.2	Leistungsverstärkung bei Neutralisation.	1342
24.2.6	Besondere Schaltungen zur Verbesserung der Anpassung.	1345
24.2.6.1	Anpassung mit Zirkulatoren.	1345
24.2.6.2	Anpassung mit Hybriden.	1347
24.2.7	Rauschen.	1348
24.2.7.1	Rauschparameter und Rauschzahl.	1348
24.2.7.2	Entwurf eines rauscharmen Verstärkers.	1348
24.3	Breitband-Verstärker.	1351
24.3.1	Prinzip eines Breitband-Verstärkers.	1351
24.3.2	Ausführung eines Breitband-Verstärkers.	1353
24.4	Kenngrößen von Hochfrequenz-Verstärkern.	1357
24.4.1	Leistungsverstärkung	1357
24.4.1.1	Klemmenleistungsgewinn.	1358
24.4.1.2	Einfügungsgewinn.	1359
24.4.1.3	Übertragungsgewinn.	1359
24.4.1.4	Verfügbarer Leistungsgewinn.	1360
24.4.1.5	Vergleich der Gewinn-Definitionen.	1361
24.4.1.6	Gewinn bei beidseitiger Anpassung.	1361
24.4.1.7	Maximaler Leistungsgewinn bei Transistoren.	1362
24.4.2	Nichtlineare Kenngrößen	1364
24.4.2.1	Betriebsbedingungen.	1365
24.4.2.2	Kennlinien eines Hochfrequenz-Verstärkers.	1365
24.4.2.3	Kleinsignalverstärkung	1367
24.4.2.4	Kompressionspunkt	1368
24.4.2.5	Intermodulation.	1369
25.	Mischer.	1371

25.1	Funktionsprinzip eines idealen Mischers.	1371
25.1.1	Aufwärtsmischer.	1372
25.1.2	Abwärtsmischer.	1372
25.1.3	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1375
25.2	Funktionsprinzipien bei praktischen Mischern.	1377
25.2.1	Additive Mischung	1377
25.2.1.1	Gleichungsmäßige Beschreibung	1377
25.2.1.2	Nichtlinearität.	1378
25.2.1.3	Praktische Ausführung.	1381
25.2.1.4	Einsatz additiver Mischer.	1386
25.2.2	Multiplikative Mischung.	1386
25.2.2.1	Gleichungsmäßige Beschreibung.	1386
25.2.2.2	Schaltverhalten der Schalter.	1389
25.2.2.3	Nichtlinearität.	1390
25.2.2.4	Praktische Ausführung.	1390
25.3	Mischer mit Dioden.	1390
25.3.1	Eintaktmischer.	1391
25.3.1.1	LO-Kreis.	1393
25.3.1.2	Kleinsignalersatzschaltbild.	1395
25.3.1.3	Kleinsignalverhalten.	1396
25.3.1.4	Mischerverstärkung.	1398
25.3.1.5	Mischgewinn.	1399
25.3.1.6	Vergleich mit idealem Schalter.	1401
25.3.1.7	Nachteile des Eintaktmischers.	1402
25.3.2	Gegentaktmischer.	1402
25.3.2.1	LO-Kreis.	1404
25.3.2.2	Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1404
25.3.2.3	Vor- und Nachteile des Gegentaktmischers.	1405
25.3.3	Ringmischer.	1406
25.3.3.1	LO-Kreis.	1407
25.3.3.2	Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1409
25.3.4	Breitbandiger Betrieb.	1411
25.3.4.1	Kleinsignalverhalten.	1412
25.3.4.2	Anpassung.	1414
25.3.4.3	Mischgewinn.	1415
25.3.4.4	Allgemeiner Fall.	1417
25.3.4.5	Vergleich von Schmalband- und Breitbandbetrieb	1423
25.3.5	Kenngrößen.	1423
25.3.6	Rauschen	1424
25.3.6.1	Verfahren zur Berechnung der Rauschzahl.	1425
25.3.6.2	Näherungen für Schmalband- und Breitbandbetrieb	1427
25.3.7	Praktische Diodenmischer.	1429
25.4	Passive Mischer mit Feldeffekttransistoren.	1431
25.4.1	Eintaktmischer.	1432
25.4.1.1	LO-Kreis.	1432
25.4.1.2	Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1438
25.4.1.3	Nachteile des Eintaktmischers.	1441

25.4.2	Gegentaktmischer	1442
25.4.3	Ringmischer	1445
25.4.4	Integrierte Fet-Mischer	1446
25.4.5	Eigenschaften von passiven Fet-Mischern	1449
25.4.5.1	Frequenzbereich	1449
25.4.5.2	LO-Leistung	1449
25.4.5.3	Nichtlinearität	1449
25.4.5.4	Rauschen	1449
25.5	Aktive Mischer mit Transistoren	1450
25.5.1	Gegentaktmischer	1450
25.5.1.1	Berechnung des Übertragungsverhaltens	1451
25.5.1.2	Rechteckförmige LO-Spannung	1452
25.5.1.3	Sinusförmige LO-Spannung	1453
25.5.1.4	Kleinsignalverhalten	1454
25.5.1.5	Mischverstärkung	1455
25.5.1.6	Bandbreite	1455
25.5.1.7	Anpassung	1456
25.5.1.8	Mischgewinn	1457
25.5.1.9	Praktische Ausführung	1459
25.5.1.10	Gegentaktmischer mit Übertragern	1461
25.5.1.11	Nachteil des Gegentaktmischer mit Transistoren	1463
25.5.2	Doppel-Gegentaktmischer (Gilbert-Mischer)	1463
25.5.2.1	Berechnung des Übertragungsverhaltens	1465
25.5.2.2	Kleinsignalverhalten	1467
25.5.2.3	Mischverstärkung	1468
25.5.2.4	Bandbreite	1469
25.5.2.5	Doppel-Gegentaktmischer in integrierten Schaltungen	1469
25.5.2.6	Anpassung	1470
25.5.2.7	Mischgewinn	1472
25.5.2.8	I/Q-Mischer mit Doppel-Gegentaktmischern	1474
25.5.3	Kenngrößen	1475
25.5.4	Rauschen	1475
25.6	Vergleich aktiver und passiver Mischer	1478
25.6.1	Rauschzahl, Intercept-Punkt und Dynamikbereich	1478
25.6.2	Bandbreite	1479
25.6.3	LO-Leistung	1480
25.7	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1480
25.7.1	Phasenschieber	1481
25.7.1.1	RC-Phasenschieber	1481
25.7.1.2	RC-Polyphasen-Filter	1481
25.7.1.3	Hybride als Phasenschieber	1483
25.7.2	Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1484
26.	Oszillatoren	1487
26.1	LC-Oszillatoren	1488
26.1.1	LC-Resonanzkreise	1488
26.1.2	Verstärker mit selektiver Mitkopplung	1491
26.1.2.1	Mitkopplung mit Parallelschwingkreis	1492

	26.1.2.2 Mitkopplung mit Serienschwingkreis	. . . . .	1493
	26.1.2.3 Vergleich der Schaltungen	. . . . .	1493
26.1.3	Schleifenverstärkung	. . . . .	1493
	26.1.3.1 Berechnung bei Verstärkern ohne Rückwirkung	. . . . .	1493
	26.1.3.2 Berechnung bei Verstärkern mit Rückwirkung	. . . . .	1495
	26.1.3.3 Güte der Schleifenverstärkung	. . . . .	1497
	26.1.3.4 Übertragungsfunktion und Zeitsignale	. . . . .	1498
	26.1.3.5 Schleifenverstärkung bei Übersteuerung	. . . . .	1500
	26.1.3.6 Negative Widerstände	. . . . .	1501
26.1.4	LC-Oszillatoren mit zweistufigen Verstärkern	. . . . .	1502
	26.1.4.1 Zweistufiger LC-Oszillator mit Parallelschwingkreis	. . . . .	1502
	26.1.4.2 Zweistufiger Oszillator mit Serienschwingkreis	. . . . .	1506
	26.1.4.3 Zusammenfassung der wichtigen Punkte	. . . . .	1508
26.1.5	LC-Oszillatoren mit einstufigen Verstärkern	. . . . .	1509
	26.1.5.1 Colpitts-Oszillator in Basisschaltung	. . . . .	1510
	26.1.5.2 Colpitts-Oszillator in Kollektorschaltung	. . . . .	1515
	26.1.5.3 Colpitts-Oszillator in Emitterschaltung	. . . . .	1521
	26.1.5.4 Colpitts-Oszillator mit CMOS-Inverter	. . . . .	1522
	26.1.5.5 Colpitts-Oszillator mit Differenzverstärker	. . . . .	1523
	26.1.5.6 Eigenschaften integrierter und diskreter Colpitts-Oszillatoren	. . . . .	1525
	26.1.5.7 Hartley-Oszillatoren	. . . . .	1527
	26.1.5.8 Gegentaktozillatoren	. . . . .	1528
	26.1.5.9 Weitere Oszillatoren	. . . . .	1534
26.2	Oszillatoren mit Leitungen	. . . . .	1536
	26.2.1 Leitungsresonatoren	. . . . .	1537
	26.2.1.1 Ersatzschaltbild	. . . . .	1537
	26.2.1.2 Betriebsbedingungen	. . . . .	1537
	26.2.1.3 Berechnung der Elemente	. . . . .	1537
	26.2.1.4 Praktische Leitungsresonatoren	. . . . .	1539
	26.2.1.5 Leitungsparameter	. . . . . f	1543
	26.2.2 Schaltungen	. . . . . l	1545
	26.2.2.1 Oszillatoren mit Leitungsresonatoren	. . . . .	1545
	26.2.2.2 Oszillatoren mit dielektrischen Resonatoren	. . . . .	1549
26.3	Quarz-Oszillatoren	. . . . .	1549
	26.3.1 Quarz-Resonatoren	. . . . .	1550
	26.3.1.1 Ersatzschaltbild	. . . . .	1551
	26.3.1.2 Impedanz und Resonanzfrequenzen	. . . . .	1551
	26.3.1.3 Frequenzabgleich	. . . . .	1554
	26.3.1.4 Verlustleistung	. . . . .	1556
	26.3.1.5 Temperaturverhalten	. . . . .	1557
	26.3.2 Schaltungen	. . . . .	1557
	26.3.2.1 Taktoszillatoren	. . . . .	1558
	26.3.2.2 Referenzoszillatoren	. . . . .	1561
	26.3.3 Alternative Resonatoren	. . . . .	1567
	26.3.3.1 Keramische Resonatoren	. . . . .	1567
	26.3.3.2 Oberflächenwellen-Resonatoren	. . . . .	1567

26.4	Frequenzabstimmung	.1569
26.4.1	Varaktoren	.1570
26.4.1.1	Bipolare Varaktoren	.1570
26.4.1.2	MOS-Varaktoren	.1570
26.4.1.3	Kleinsignalmodell	.1571
26.4.2.	Abstimmung	.1572
26.4.2.1	Abstimmung eines Parallelschwingkreises	.1572
26.4.2.2	Kennlinie	.1577
26.4.2.3	Abstimmung eines Serienschwingkreises	.1579
26.4.2.4	Breitband-Abstimmung	.1579
26.4.2.5	Aussteuerung	.1582
26.4.2.6	Modulation	.1583
26.5	Amplitudenregelung	.1584
26.5.1	Regelung und Begrenzung	.1584
26.5.2	Regelmechanismen	.1585
26.5.2.1	Regelung über den Ruhestrom	.1585
26.5.2.2	Regelung mit Stromteiler	.1586
26.5.3	Amplitudenmessung	.1587
26.6	Phasenrauschen	.1589
26.6.1	Darstellung im Zeit- und im Frequenzbereich	.1589
26.6.1.1	Zeitbereich	.1589
26.6.1.2	Frequenzbereich	.1591
26.6.2	Entstehung	.1594
26.6.2.1	Linearer Anteil	.1595
26.6.2.2	Modulations- und Konversionsanteil	.1598
26.6.3	Frequenzteilung und Frequenzvervielfachung	.1599
26.6.4	Betrieb mit einer phasenstarren Schleife	.1601
26.6.5	Vergleich verschiedener Oszillatoren	.1603
27.	Anhang	.1605
27.1	PSpice-Kurzanleitung	.1605
27.1.1	Grundsätzliches	.1605
27.1.2	Programme und Dateien	.1605
27.1.2.1	Spice	.1605
27.1.2.2	PSpice	.1605
27.1.3	Ein einfaches Beispiel	.1608
27.1.3.1	Eingabe des Schaltplans	.1608
27.1.3.2	Simulationsanweisungen eingeben	.1613
27.1.3.3	Simulation starten	.1616
27.1.3.4	Anzeigen der Ergebnisse	.1616
27.1.3.5	Arbeitspunkt anzeigen	.1621
27.1.3.6	Netzliste und Ausgabedatei	.1622
27.1.4	Weitere Simulationsbeispiele	.1624
27.1.4.1	Kennlinien eines Transistors	.1624
27.1.4.2	Verwendung von Parametern	.1624
27.1.5	Einbinden weiterer Bibliotheken	.1628
27.1.6	Einige typische Fehler	.1630
27.2	Passive RC- und LRC-Netzwerke	.1632

27.2.1	Der Tiefpass . . . . .	.1632
27.2.1.1	Beschreibung im Frequenzbereich . . . . .	.1632
27.2.1.2	Beschreibung im Zeitbereich . . . . .	.1633
27.2.2	Der Hochpass . . . . .	.1636
27.2.2.1	Anwendung als Koppel-RC-Glied . . . . .	.1637
27.2.2.2	Anwendung als Differenzierglied . . . . .	.1638
27.2.2.3	Reihenschaltung mehrerer Hochpässe . . . . .	.1638
27.2.3	Kompensierter Spannungsteiler . . . . .	.1638
27.2.4	Passiver RC-Bandpass . . . . .	.1639
27.2.5	Wien-Robinson-Brücke . . . . .	.1640
27.2.6	Doppel-T-Filter . . . . .	.1641
27.2.7	Schwingkreis . . . . .	.1643
27.3	Erklärung der verwendeten Größen . . . . .	.1644
27.4	Typen der 7400-Logik-Familien . . . . .	.1651
27.5	Normwert-Reihen . . . . .	.1658
27.6	Farbcode . . . . .	.1659
27.7	Hersteller . . . . .	.1661
	Literaturverzeichnis . . . . .	.1669
	Sachverzeichnis . . . . .	.1673