

Inhaltsübersicht

Teil I. Grundlagen

1. Diode	3
2. Bipolartransistor	35
3. Feldeffekttransistor	177
4. Verstärker	279
5. Operationsverstärker	509
6. Digitaltechnik Grundlagen	619
7. Schaltnetze (Kombinatorische Logik)	653
8. Schaltwerke (Sequentielle Logik)	679
9. Halbleiterspeicher	713

Teil II. Anwendungen

10. Analogrechenschaltungen	739
11. Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter	767
12. Aktive Filter	789
13. Regler	863
14. Signalgeneratoren	883
15. Leistungsverstärker	899
16. Stromversorgung	927
17. DA- und AD-Umsetzer	1007
18. Messschaltungen	1049
19. Sensorik	1081
20. Optoelektronische Bauelemente	1121

Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik

21. Grundlagen	1143
22. Sender und Empfänger	1233
23. Passive Komponenten	1283
24. Hochfrequenz-Verstärker	1321
25. Mischer	1387
26. Oszillatoren	1503
27. Phasenregelschleife (PLL)	1621
28. Anhang	1703
Literaturverzeichnis	1749
Sachverzeichnis	1753

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	Grundschialtung	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-Differenzver- stärkers	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
5.	Operationsverstärker	509
5.1	Übersicht	509
5.1.1	Operationsverstärker Grundlagen	509
5.1.2	Operationsverstärker-Typen	510
5.2	Der normale Operationsverstärker (VV-OPV)	513
5.2.1	Prinzip der Gegenkopplung	513
5.2.1.1	Der nichtinvertierende Verstärker	514

5.2.1.2	Der invertierende Verstärker	517
5.2.2	Einfache Spannungsverstärkung	519
5.2.2.1	Einfache Verstärker	519
5.2.2.2	Endstufen für Operationsverstärker	523
5.2.2.3	Verstärker mit Kaskodeschaltung	525
5.2.3	Zweifache Spannungsverstärkung	527
5.2.3.1	Gebräuchliche Schaltungstechnik	527
5.2.3.2	Single-Supply-Verstärker	529
5.2.4	Breitband-Operationsverstärker	530
5.2.5	Niedrige Betriebsspannungen	534
5.2.5.1	Betrieb mit einer einzigen Betriebsspannungsquelle ..	534
5.2.5.2	Rail-to-Rail-Verstärker	536
5.2.6	Verstärker mit internem Offsetabgleich	543
5.2.7	Verstärker mit symmetrischen Ausgängen	546
5.3	Spannungsfolger, Buffer	550
5.3.1	Open-Loop-Buffer	550
5.3.2	Closed-Loop-Buffer	551
5.4	Frequenzgang-Korrektur	555
5.4.1	Grundlagen	555
5.4.2	Eine Verstärkerstufe	556
5.4.3	Zwei Verstärkerstufen	558
5.4.4	Universelle Frequenzgang-Korrektur	559
5.4.5	Angepasste Frequenzgangkorrektur	563
5.4.6	Slew-Rate	564
5.4.7	Kapazitive Last	566
5.5	Parameter von Operationsverstärkern	568
5.5.1	Differenz- und Gleichtaktverstärkung	570
5.5.2	Offsetspannung	573
5.5.3	Eingangsströme	575
5.5.4	Eingangswiderstände	577
5.5.5	Ausgangswiderstand	579
5.5.6	Beispiel für statische Fehler	579
5.5.7	Bandbreite	581
5.5.8	Rauschen	583
5.6	Der Transimpedanzverstärker (CV-OPV)	587
5.6.1	Innerer Aufbau	587
5.6.2	Vergleich von VV- und CV-Operationsverstärkern	590
5.6.3	Typische Anwendungen	594
5.7	Der Transkonduktanz-Verstärker (VC-OPV)	595
5.7.1	Innerer Aufbau	595
5.7.2	Typische Anwendung	598
5.8	Der Strom-Verstärker (CC-OPV)	600
5.8.1	Innerer Aufbau	600
5.8.2	Typische Anwendung	602
5.8.2.1	Anwendungen mit Stromgegenkopplung	602
5.8.2.2	Anwendungen mit Spannungsgegenkopplung	607
5.9	Einsatz von Operationsverstärkern	609

5.9.1	Praktischer Einsatz	609
5.9.1.1	Abblocken der Betriebsspannungen	610
5.9.1.2	Schwingneigung	610
5.9.1.3	Dämpfung	611
5.9.1.4	Gegenkopplungswiderstände	611
5.9.1.5	Verlustleistung	611
5.9.1.6	Kühlung	611
5.9.1.7	Übersteuerung	611
5.9.1.8	Eingangsschutz	612
5.10	Vergleich	612
6.	Digitaltechnik Grundlagen	619
6.1	Die logischen Grundfunktionen	619
6.2	Aufstellung logischer Funktionen	621
6.2.1	Das Karnaugh-Diagramm	623
6.3	Abgeleitete Grundfunktionen	626
6.4	Schaltungstechnische Realisierung der Grundfunktionen	627
6.4.1	Statische und dynamische Daten	627
6.4.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL)	629
6.4.2.1	Open-Collector-Ausgänge	630
6.4.2.2	Tristate-Ausgänge	631
6.4.3	Komplementäre MOS-Logik (CMOS)	632
6.4.3.1	CMOS-Inverter	632
6.4.3.2	Offene Eingänge	633
6.4.3.3	Statische Ladungen	634
6.4.3.4	CMOS-Gatter	635
6.4.3.5	Transmission-Gate	635
6.4.4	Emittergekoppelte Logik (ECL)	637
6.4.4.1	PECL-Gatter	637
6.4.4.2	NECL-Gatter	638
6.4.4.3	Wired-OR-Verknüpfung	639
6.4.4.4	Schaltzeiten	639
6.4.4.5	Verlustleistung	640
6.4.5	Current Mode Logik (CML)	640
6.4.5.1	CML-Gatter	641
6.4.5.2	CML-Flip-Flop	643
6.4.6	Low Voltage Differential Signaling (LVDS)	643
6.4.7	Vergleich der Logikfamilien	645
6.5	Verbindungsleitungen	646
6.6	Hazards	648
6.7	Kopplung von Logikfamilien	649
6.8	Betriebsspannungen	650
7.	Schaltnetze (Kombinatorische Logik)	653
7.1	Multiplexer	654
7.1.1	1-aus-n-Decoder	655
7.1.2	Demultiplexer	655
7.1.3	Multiplexer	656
7.2	Schiebelogik (Barrel Shifter)	658

7.3	Prioritätsdecoder	659
7.4	Kombinatorischer Zähler	660
7.5	Paritätsgenerator	660
7.6	Komparatoren	661
7.7	Zahlendarstellung	663
7.7.1	Positive ganze Zahlen im Dualcode	663
7.7.1.1	Oktalcode	663
7.7.1.2	Hexadezimalcode	663
7.7.2	BCD-Code	664
7.7.3	Ganze Dualzahlen mit beliebigem Vorzeichen	664
7.7.3.1	Darstellung nach Betrag und Vorzeichen	664
7.7.3.2	Darstellung im Zweierkomplement (Two's Complement)	665
7.7.3.3	Vorzeichenergänzung (Sign Extension)	666
7.7.3.4	Offset-Dual-Darstellung (Offset Binary)	666
7.7.4	Festkomma-Dualzahlen	667
7.7.5	Gleitkomma-Dualzahlen	667
7.8	Addierer	670
7.8.1	Halbaddierer	670
7.8.2	Volladdierer	671
7.8.3	Parallele Übertragslogik	671
7.8.4	Subtraktion	673
7.8.5	Zweierkomplement-Überlauf	674
7.8.6	Addition und Subtraktion von Gleitkomma-Zahlen	675
7.9	Multiplizierer	675
7.9.1	Multiplikation von Festkomma-Zahlen	675
7.9.2	Multiplikation von Gleitkomma-Zahlen	677
8.	Schaltwerke (Sequentielle Logik)	679
8.1	Flip-Flops	679
8.1.1	Transparente Flip-Flops	680
8.1.1.1	Flip-Flop Grundschialtung	680
8.1.1.2	Taktzustandgesteuerte RS-Flip-Flops	681
8.1.1.3	Taktzustandgesteuerte D-Flip-Flops	681
8.1.2	Flip-Flops mit Zwischenspeicherung	682
8.1.2.1	JK Master-Slave Flip-Flops	683
8.1.2.2	D Master-Slave Flip-Flops	684
8.1.3	Zeitverhalten von Flip-Flops	685
8.1.3.1	Vergleich JK- und D-Flip-Flops	685
8.1.3.2	Metastabilität	686
8.1.4	Flip-Flops für Zähler	688
8.2	Dualzähler	690
8.2.1	Asynchroner Dualzähler	691
8.2.2	Synchrone Dualzähler	692
8.2.3	Vorwärts-Rückwärts-Zähler	694
8.2.3.1	Zähler mit umschaltbarer Zählrichtung	694
8.2.3.2	Zähler mit Vorwärts- und Rückwärts-Eingängen	695
8.3	Synchrone BCD-Zähler	695

8.4	Vorwahlzähler	696
8.5	Schieberegister	698
8.5.1	Grundschialtung	698
8.5.2	Schieberegister mit Paralleleingabe	698
8.5.3	Erzeugung von Pseudozufallsfolgen	700
8.6	Aufbereitung asynchroner Signale	702
8.6.1	Entprellung mechanischer Kontakte	702
8.6.2	Flankengetriggertes RS-Flip-Flop	703
8.6.3	Synchronisation von asynchronen Daten	704
8.6.4	Synchroner Zeitschalter	704
8.6.5	Synchroner Änderungsdetektor	706
8.6.6	Synchroner Taktschalter	706
8.7	Systematischer Entwurf von Schaltwerken	706
8.7.1	Zustandsdiagramm	707
8.7.2	Entwurfsbeispiel für einen Dualzähler	708
8.7.3	Entwurfsbeispiel für einen umschaltbaren Zähler	709
9.	Halbleiterspeicher	713
9.1	Programmierbare Logik	713
9.1.1	Programmierbare Logische Bauelemente (PLDs)	713
9.1.2	Anwender-programmierbare Gate-Arrays	716
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
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	761
10.8.1	Multiplizierer mit logarithmierenden Funktionsgeneratoren	761
10.8.2	Steilheitsmultiplizierer	762
11.	Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter	767
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
12.	Aktive Filter	789
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	Grundschtaltung	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
13.	Regler	863
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

14. Signalgeneratoren	883
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	887
14.3 Rechteckgeneratoren	890
14.3.1 Funktionsgeneratoren	890
14.3.2 Einfache Rechteckgeneratoren	892
14.3.2.1 Timer als Schmitt-Trigger	892
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	895
14.4 Sinusschwingungen	896
14.4.1 Generator für beliebige Signale	896
14.4.2 Direkte Digitale Synthese	897
15. Leistungsverstärker	899
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	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
16. Stromversorgung	927
16.1 Eigenschaften von Netztransformatoren	929
16.2 Netzgleichrichter	930
16.2.1 Einweggleichrichter	930
16.2.2 Brückengleichrichter	932
16.2.3 Mittelpunkt-Schaltung	935
16.2.3.1 Grundschialtung	935
16.2.3.2 Doppelte Mittelpunktschaltung	936
16.3 Lineare Spannungsregler	937
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
16.4	Erzeugung der Referenzspannung	943
16.4.1	Referenzspannungsquellen mit Dioden	943
16.4.2	Bandabstands-Referenz	945
16.5	Schaltregler ohne Potentialtrennung	947
16.5.1	Der Abwärtswandler	948
16.5.1.1	Prinzip	948
16.5.1.2	Ausführungsbeispiel	950
16.5.1.3	Leistungsschalter	952
16.5.1.4	Pulsbreitenmodulation	954
16.5.1.5	Pulsfrequenzmodulation	957
16.5.2	Aufwärts-Wandler	959
16.5.3	Invertierender Wandler	960
16.5.4	Aufwärts- Abwärtswandler	961
16.5.5	Sepic Konverter	962
16.5.6	Spannungswandler mit Ladungspumpe	963
16.6	Schaltregler mit Potentialtrennung	965
16.6.1	Eintakt-Wandler	965
16.6.1.1	Eintakt-Sperrwandler	965
16.6.1.2	Eintakt-Durchflusswandler	968
16.6.2	Gegentakt-Wandler	970
16.6.2.1	Gegentakt-Wandler mit Parallelspeisung	970
16.6.2.2	Gegentakt-Wandler in Halbbrückenschaltung	971
16.6.2.3	Gegentakt-Wandler in Brückenschaltung	973
16.6.3	Resonanzumrichter	976
16.6.4	Aktive Gleichrichtung	976
16.6.5	Leistungsschalter	979
16.6.5.1	Leistungstransistoren	979
16.6.5.2	Gatetreiber ohne Potentialtrennung	983
16.6.5.3	Gatetreiber mit Potentialtrennung	986
16.6.6	Hochfrequenztransformatoren	989
16.6.7	Verlustanalyse	991
16.7	Leistungsfaktorkorrektur	992
16.8	Solarwechselrichter	995
16.9	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	998
16.10	Stromversorgung mit Akkus	999
16.10.1	Akkutechnologien	999
16.10.2	Entladung	1000
16.10.3	Ladung	1001
16.10.4	Ladegerät	1003
17.	DA- und AD-Umsetzer	1007
17.1	Systemtheoretische Grundlagen	1008
17.1.1	Quantisierung der Zeit	1008

17.1.1.1	Abtasttheorem	1008
17.1.1.2	Rückgewinnung des Analogsignals	1010
17.1.1.3	Praktische Gesichtspunkte	1010
17.1.2	Quantisierung der Amplitude	1013
17.1.3	Spannungseinheit	1014
17.2	Digital-Analog Umsetzung	1014
17.2.1	Grundprinzipien der DA-Umsetzung	1014
17.2.2	Wägeverfahren mit geschalteten Spannungen	1015
17.2.2.1	Einsatz von Wechselschaltern	1016
17.2.2.2	Leiternetzwerk	1017
17.2.2.3	Inversbetrieb eines Leiternetzwerks	1018
17.2.3	Wägeverfahren mit geschalteten Strömen	1019
17.2.4	DA-Umsetzer für spezielle Anwendungen	1020
17.2.4.1	Verarbeitung vorzeichenbehafteter Zahlen	1020
17.2.4.2	Multiplizierende DA-Umsetzer	1022
17.2.4.3	Dividierende DA-Umsetzer	1023
17.2.5	Genauigkeit von DA-Umsetzern	1023
17.2.5.1	Statische Kenngrößen	1023
17.2.5.2	Glitche	1024
17.3	Analog-Digital Umsetzer	1025
17.3.1	Parallelverfahren	1025
17.3.2	Pipelineumsetzer	1027
17.3.3	Wägeverfahren	1030
17.3.4	Zählverfahren	1031
17.3.4.1	Modifiziertes Wägeverfahren	1031
17.3.4.2	Dual-Slope-Verfahren	1033
17.3.5	Überabtastung	1034
17.3.6	Delta-Sigma-Verfahren	1036
17.3.7	Genauigkeit von AD-Umsetzern	1040
17.3.7.1	Statische Fehler	1040
17.3.7.2	Dynamische Fehler	1041
17.3.7.3	Vergleich der Verfahren	1042
17.4	Abtast-Halte-Glieder	1044
17.4.1	Grundlagen	1044
17.4.2	Transmission-Gate als Schalter	1046
17.4.3	Dioden-Brücke als Schalter	1046
18.	Messschaltungen	1049
18.1	Spannungsmessung	1049
18.1.1	Impedanzwandler	1049
18.1.1.1	Vergrößerung der Spannungsaussteuerbarkeit	1049
18.1.2	Messung von Potentialdifferenzen	1050
18.1.2.1	Subtrahierer mit beschalteten Operationsverstärkern	1050
18.1.2.2	Subtrahierer für hohe Spannungen	1052
18.1.2.3	Subtrahierer mit gekoppelten Differenzverstärkern	1053
18.1.2.4	Subtrahierer in SC-Technik	1054
18.1.3	Trennverstärker (Isolation Amplifier)	1055

18.2	Strommessung	1057
18.2.1	Strommessung mit Shunts	1057
18.2.2	Potentialfreies Amperemeter mit niedrigem Spannungsabfall	1060
18.2.3	Strommessung auf hohem Potential	1061
18.2.4	Strommessung über das Magnetfeld	1061
18.3	Messgleichrichter (AC/DC-Converter)	1064
18.3.1	Messung des Betragsmittelwertes	1064
18.3.1.1	Vollweggleichrichter mit Signalausgang	1065
18.3.1.2	Gleichrichtung durch Umschalten des Vorzeichens	1066
18.3.1.3	Breitband-Vollweggleichrichter	1066
18.3.2	Messung des Effektivwertes	1067
18.3.2.1	Echte Effektivwertmessung (True RMS)	1069
18.3.2.2	Leistungsmesser	1071
18.3.3	Messung des Scheitelwertes	1072
18.3.3.1	Momentane Scheitelwertmessung	1073
18.3.4	Synchrone Gleichrichter	1075
19.	Sensorik	1081
19.1	Temperaturmessung	1081
19.1.1	Kaltleiter auf Silizium-Basis, PTC-Sensoren	1084
19.1.2	Metalle als Kaltleiter, PTC-Sensoren	1088
19.1.3	Heißleiter, NTC-Sensoren	1089
19.1.4	Transistor als Temperatursensor	1090
19.1.5	Das Thermoelement	1093
19.2	Druckmessung	1097
19.2.1	Aufbau von Drucksensoren	1098
19.2.2	Betrieb temperaturkompensierter Drucksensoren	1099
19.2.3	Temperaturkompensation von Drucksensoren	1101
19.3	Feuchtemessung	1103
19.3.1	Feuchtesensoren	1104
19.3.2	Betriebsschaltungen für kapazitive Feuchtesensoren	1104
19.4	Drehwinkelkodierer	1106
19.5	Übertragung von Sensorsignalen	1109
19.5.1	Galvanisch gekoppelte Signalübertragung	1109
19.5.2	Galvanisch getrennte Signalübertragung	1112
19.6	Kalibrierung von Sensorsignalen	1114
19.6.1	Kalibrierung des Analogsignals	1114
19.6.2	Computer-gestützte Kalibrierung	1117
20.	Optoelektronische Bauelemente	1121
20.1	Fotometrische Grundbegriffe	1121
20.2	Leuchtdioden	1124
20.3	Fotodiode	1126
20.3.1	Fotozellen als Empfänger	1127
20.3.2	Fotozellen zur Energiegewinnung	1128
20.4	Fototransistor	1129
20.5	Optokoppler	1129
20.6	Optische Anzeige	1130
20.6.1	Flüssigkristallanzeigen	1130

20.6.2	Binär-Anzeige	1131
20.6.3	Analog-Anzeige	1133
20.6.4	Numerische Anzeige	1134
20.6.5	Multiplex Anzeige	1136
20.6.6	Alpha-Numerische Anzeige	1137
20.6.6.1	16-Segment-Anzeigen	1137
20.6.6.2	35-Punktmatrix-Anzeigen	1138

Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik

21. Grundlagen	1143
21.1 Nachrichtentechnische Systeme	1143
21.2 Übertragungskanäle	1146
21.2.1 Leitung	1146
21.2.1.1 Feldwellenwiderstand und Ausbreitungsgeschwindigkeit	1147
21.2.1.2 Leitungswellenwiderstand	1147
21.2.1.3 Leitungsgleichung	1148
21.2.1.4 Dämpfung	1151
21.2.1.5 Kenngrößen einer Leitung	1152
21.2.1.6 Vierpoldarstellung einer Leitung	1153
21.2.1.7 Leitung mit Abschluss	1154
21.2.1.8 Streifenleitung	1156
21.2.2 Drahtlose Verbindung	1157
21.2.2.1 Antennen	1157
21.2.2.2 Leistungsübertragung über eine drahtlose Verbindung	1160
21.2.2.3 Frequenzbereiche	1161
21.2.3 Faseroptische Verbindung	1162
21.2.3.1 Lichtwellenleiter	1163
21.2.3.2 Wellenlängenbereiche	1166
21.2.4 Vergleich der Übertragungskanäle	1167
21.3 Reflexionsfaktor und S-Parameter	1168
21.3.1 Wellengrößen	1168
21.3.1.1 Darstellung mit Hilfe von Spannung und Strom	1169
21.3.2 Reflexionsfaktor	1170
21.3.2.1 Reflexionsfaktor-Ebene (r -Ebene)	1170
21.3.2.2 Einfluss einer Leitung auf den Reflexionsfaktor	1171
21.3.2.3 Stehwellenverhältnis	1173
21.3.3 Wellenquelle	1176
21.3.3.1 Unabhängige Welle einer Wellenquelle	1176
21.3.3.2 Verfügbare Leistung	1176
21.3.4 S-Parameter	1177
21.3.4.1 S-Matrix	1177
21.3.4.2 Messung der S-Parameter	1180
21.3.4.3 Zusammenhang mit den Y-Parametern	1180
21.3.4.4 S-Parameter eines Transistors	1180
21.3.4.5 Ortskurven	1182
21.4 Modulationsverfahren	1184

21.4.1	Amplitudenmodulation	1188
21.4.1.1	Darstellung im Zeitbereich	1189
21.4.1.2	Darstellung im Frequenzbereich	1191
21.4.1.3	Modulation	1192
21.4.1.4	Demodulation	1193
21.4.2	Frequenzmodulation	1196
21.4.2.1	Darstellung im Zeitbereich	1197
21.4.2.2	Darstellung im Frequenzbereich	1198
21.4.2.3	Modulation	1201
21.4.2.4	Demodulation	1201
21.4.3	Digitale Modulationsverfahren	1204
21.4.3.1	Einfache Tastverfahren	1204
21.4.3.2	I/Q-Darstellung digitaler Modulationsverfahren	1207
21.4.3.3	Impulsformung	1214
21.4.3.4	Ein einfacher QPSK-Modulator	1219
21.5	Mehrfachnutzung und Gruppierung von Kanälen	1222
21.5.1	Multiplex-Verfahren	1222
21.5.1.1	Frequenzmultiplex	1222
21.5.1.2	Zeitmultiplex	1223
21.5.1.3	Codemultiplex	1224
21.5.2	Duplex-Verfahren	1230
21.5.2.1	Frequenzduplex	1230
21.5.2.2	Zeitduplex	1230
22.	Sender und Empfänger	1233
22.1	Sender	1233
22.1.1	Sender mit analoger Modulation	1233
22.1.1.1	Sender mit direkter Modulation	1233
22.1.1.2	Sender mit einer Zwischenfrequenz	1233
22.1.1.3	Sender mit zwei Zwischenfrequenzen	1236
22.1.1.4	Sender mit variabler Sendefrequenz	1238
22.1.2	Sender mit digitaler Modulation	1238
22.1.3	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen	1239
22.2	Empfänger	1241
22.2.1	Geradeusempfänger	1241
22.2.2	Überlagerungsempfänger	1242
22.2.2.1	HF-Filter	1243
22.2.2.2	Vorverstärker	1244
22.2.2.3	Vorselektion	1245
22.2.2.4	ZF-Filter	1245
22.2.2.5	Überlagerungsempfänger mit zwei Zwischenfrequenzen	1246
22.2.2.6	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen	1247
22.2.3	Verstärkungsregelung	1248
22.2.3.1	Regelverhalten	1249
22.2.3.2	Regelbarer Verstärker (VGA)	1251
22.2.3.3	Anordnung der Verstärkungsregelung im Empfänger	1253
22.2.3.4	Pegeldetektion	1253

22.2.3.5	Digitale Verstärkungsregelung	1254
22.2.4	Dynamikbereich eines Empfängers	1255
22.2.4.1	Rauschzahl des Empfängers	1257
22.2.4.2	Minimaler Empfangspegel	1258
22.2.4.3	Maximaler Empfangspegel	1259
22.2.4.4	Dynamikbereich	1260
22.2.5	Empfänger für digitale Modulationsverfahren	1265
22.2.5.1	Empfänger mit digitalen Kanalfiltern	1267
22.2.5.2	Empfänger mit ZF-Abtastung und digitalen Kanalfiltern	1272
22.2.5.3	Vergleich der Empfänger für digitale Modulationsverfahren	1276
22.2.5.4	Direktumsetzender Empfänger	1277
23.	Passive Komponenten	1283
23.1	Hochfrequenz-Ersatzschaltbilder	1283
23.1.1	Widerstand	1284
23.1.2	Spule	1285
23.1.3	Kondensator	1288
23.2	Filter	1289
23.2.1	LC-Filter	1290
23.2.1.1	Zweikreisiges Bandfilter	1290
23.2.1.2	Filter mit Leitungen	1295
23.2.2	Dielektrische Filter	1296
23.2.3	SAW-Filter	1298
23.3	Schaltungen zur Impedanztransformation	1300
23.3.1	Anpassung	1301
23.3.1.1	Anpassnetzwerke mit zwei Elementen	1301
23.3.1.2	Collins-Filter	1305
23.3.1.3	Anpassung mit Streifenleitungen	1306
23.3.2	Ankopplung	1311
23.3.2.1	Ankopplung mit kapazitivem Spannungsteiler	1312
23.3.2.2	Ankopplung mit induktivem Spannungsteiler	1313
23.3.2.3	Ankopplung mit festgekoppeltem induktivem Spannungsteiler	1313
23.4	Leistungsteiler und Hybride	1313
23.4.1	Leistungsteiler	1315
23.4.1.1	Verlustbehaftete Leistungsteiler mit Widerständen	1315
23.4.1.2	Wilkinson-Teiler	1315
23.4.2	Hybride	1316
23.4.2.1	S-Parameter eines Hybrids	1316
23.4.2.2	Hybride mit Spulen und Kondensatoren	1318
23.4.2.3	Hybride mit Leitungen	1318
24.	Hochfrequenz-Verstärker	1321
24.1	Integrierte Hochfrequenz-Verstärker	1321
24.1.1	Anpassung	1323
24.1.1.1	Eingangsseitige Anpassung	1323
24.1.1.2	Ausgangsseitige Anpassung	1324

24.1.2	Rauschzahl	1325
24.1.3	Entwurf rauscharmer integrierter HF-Verstärker (LNA)	1327
24.1.3.1	Ohmsche Gegenkopplung bei niedrigen Frequenzen ..	1328
24.1.3.2	Gegenkopplung bei hohen Frequenzen	1334
24.2	HF-Verstärker mit Einzeltransistoren	1344
24.2.1	Verallgemeinerter Einzeltransistor	1345
24.2.2	Arbeitspunkteinstellung	1346
24.2.2.1	Gleichstromgegenkopplung	1346
24.2.2.2	Gleichspannungsgegenkopplung	1348
24.2.2.3	Arbeitspunktregelung	1348
24.2.3	Anpassung einstufiger Verstärker	1349
24.2.3.1	Bedingungen für die Anpassung	1349
24.2.3.2	Reflexionsfaktoren des Transistors	1350
24.2.3.3	Berechnung der Anpassung	1351
24.2.3.4	Stabilität bei der Betriebsfrequenz	1351
24.2.3.5	Berechnung der Anpassnetzwerke	1352
24.2.3.6	Stabilität im ganzen Frequenzbereich	1352
24.2.3.7	Leistungsverstärkung	1352
24.2.4	Anpassung mehrstufiger Verstärker	1357
24.2.4.1	Anpassung mit Serien-Induktivität	1358
24.2.5	Neutralisation	1358
24.2.5.1	Schaltungen zur Neutralisation	1358
24.2.5.2	Leistungsverstärkung bei Neutralisation	1358
24.2.6	Besondere Schaltungen zur Verbesserung der Anpassung	1361
24.2.6.1	Anpassung mit Zirkulatoren	1361
24.2.6.2	Anpassung mit Hybriden	1363
24.2.7	Rauschen	1364
24.2.7.1	Rauschparameter und Rauschzahl	1364
24.2.7.2	Entwurf eines rauscharmen Verstärkers	1364
24.3	Breitband-Verstärker	1367
24.3.1	Prinzip eines Breitband-Verstärkers	1367
24.3.2	Ausführung eines Breitband-Verstärkers	1369
24.4	Kenngrößen von Hochfrequenz-Verstärkern	1373
24.4.1	Leistungsverstärkung	1373
24.4.1.1	Klemmenleistungsgewinn	1374
24.4.1.2	Einfügungsgewinn	1375
24.4.1.3	Übertragungsgewinn	1375
24.4.1.4	Verfügbarer Leistungsgewinn	1376
24.4.1.5	Vergleich der Gewinn-Definitionen	1377
24.4.1.6	Gewinn bei beidseitiger Anpassung	1377
24.4.1.7	Maximaler Leistungsgewinn bei Transistoren	1378
24.4.2	Nichtlineare Kenngrößen	1380
24.4.2.1	Betriebsbedingungen	1381
24.4.2.2	Kennlinien eines Hochfrequenz-Verstärkers	1381
24.4.2.3	Kleinsignalverstärkung	1383
24.4.2.4	Kompressionspunkt	1384
24.4.2.5	Intermodulation	1385

25. Mischer	1387
25.1 Funktionsprinzip eines idealen Mischers	1387
25.1.1 Aufwärtsmischer	1388
25.1.2 Abwärtsmischer	1388
25.1.3 Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1391
25.2 Funktionsprinzipen bei praktischen Mixchern	1393
25.2.1 Additive Mischung	1393
25.2.1.1 Gleichungsmäßige Beschreibung	1393
25.2.1.2 Nichtlinearität	1394
25.2.1.3 Praktische Ausführung	1397
25.2.1.4 Einsatz additiver Mischer	1402
25.2.2 Multiplikative Mischung	1402
25.2.2.1 Gleichungsmäßige Beschreibung	1402
25.2.2.2 Schaltverhalten der Schalter	1405
25.2.2.3 Nichtlinearität	1406
25.2.2.4 Praktische Ausführung	1406
25.3 Mischer mit Dioden	1406
25.3.1 Eintaktmischer	1407
25.3.1.1 LO-Kreis	1409
25.3.1.2 Kleinsignalersatzschaltbild	1411
25.3.1.3 Kleinsignalverhalten	1412
25.3.1.4 Mischverstärkung	1414
25.3.1.5 Mischgewinn	1415
25.3.1.6 Vergleich mit idealem Schalter	1417
25.3.1.7 Nachteile des Eintaktmischers	1418
25.3.2 Gegentaktmischer	1418
25.3.2.1 LO-Kreis	1420
25.3.2.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten .	1420
25.3.2.3 Vor- und Nachteile des Gegentaktmischers	1421
25.3.3 Ringmischer	1422
25.3.3.1 LO-Kreis	1423
25.3.3.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten .	1425
25.3.4 Breitbandiger Betrieb	1427
25.3.4.1 Kleinsignalverhalten	1428
25.3.4.2 Anpassung	1430
25.3.4.3 Mischgewinn	1431
25.3.4.4 Allgemeiner Fall	1433
25.3.4.5 Vergleich von Schmalband- und Breitbandbetrieb . . .	1439
25.3.5 Kenngrößen	1439
25.3.6 Rauschen	1440
25.3.6.1 Verfahren zur Berechnung der Rauschzahl	1441
25.3.6.2 Näherungen für Schmalband- und Breitbandbetrieb . .	1443
25.3.7 Praktische Diodenmischer	1445
25.4 Passive Mischer mit Feldeffekttransistoren	1447
25.4.1 Eintaktmischer	1448
25.4.1.1 LO-Kreis	1448
25.4.1.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten .	1454

25.4.1.3	Nachteile des Eintaktmischers	1457
25.4.2	Gegentaktmischer	1458
25.4.3	Ringmischer	1461
25.4.4	Integrierte Fet-Mischer	1462
25.4.5	Eigenschaften von passiven Fet-Mischern	1465
25.4.5.1	Frequenzbereich	1465
25.4.5.2	LO-Leistung	1465
25.4.5.3	Nichtlinearität	1465
25.4.5.4	Rauschen	1465
25.5	Aktive Mischer mit Transistoren	1466
25.5.1	Gegentaktmischer	1466
25.5.1.1	Berechnung des Übertragungsverhaltens	1467
25.5.1.2	Rechteckförmige LO-Spannung	1468
25.5.1.3	Sinusförmige LO-Spannung	1469
25.5.1.4	Kleinsignalverhalten	1470
25.5.1.5	Mischverstärkung	1471
25.5.1.6	Bandbreite	1471
25.5.1.7	Anpassung	1472
25.5.1.8	Mischgewinn	1473
25.5.1.9	Praktische Ausführung	1475
25.5.1.10	Gegentaktmischer mit Übertragern	1477
25.5.1.11	Nachteil des Gegentaktmischers mit Transistoren ...	1479
25.5.2	Doppel-Gegentaktmischer (Gilbert-Mischer)	1479
25.5.2.1	Berechnung des Übertragungsverhaltens	1481
25.5.2.2	Kleinsignalverhalten	1483
25.5.2.3	Mischverstärkung	1484
25.5.2.4	Bandbreite	1485
25.5.2.5	Doppel-Gegentaktmischer in integrierten Schaltungen	1485
25.5.2.6	Anpassung	1486
25.5.2.7	Mischgewinn	1488
25.5.2.8	I/Q-Mischer mit Doppel-Gegentaktmischern	1490
25.5.3	Kenngrößen	1491
25.5.4	Rauschen	1491
25.6	Vergleich aktiver und passiver Mischer	1494
25.6.1	Rauschzahl, Intercept-Punkt und Dynamikbereich	1494
25.6.2	Bandbreite	1495
25.6.3	LO-Leistung	1496
25.7	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1496
25.7.1	Phasenschieber	1497
25.7.1.1	RC-Phasenschieber	1497
25.7.1.2	RC-Polyphasen-Filter	1497
25.7.1.3	Hybride als Phasenschieber	1499
25.7.2	Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1500
26.	Oszillatoren	1503
26.1	LC-Oszillatoren	1504
26.1.1	LC-Resonanzkreise	1504
26.1.2	Verstärker mit selektiver Mitkopplung	1507

26.1.2.1	Mitkopplung mit Parallelschwingkreis	1508
26.1.2.2	Mitkopplung mit Serienschwingkreis	1509
26.1.2.3	Vergleich der Schaltungen	1509
26.1.3	Schleifenverstärkung	1509
26.1.3.1	Berechnung bei Verstärkern ohne Rückwirkung	1509
26.1.3.2	Berechnung bei Verstärkern mit Rückwirkung	1511
26.1.3.3	Güte der Schleifenverstärkung	1513
26.1.3.4	Übertragungsfunktion und Zeitsignale	1514
26.1.3.5	Schleifenverstärkung bei Übersteuerung	1516
26.1.3.6	Negative Widerstände	1517
26.1.4	LC-Oszillatoren mit zweistufigen Verstärkern	1518
26.1.4.1	Zweistufiger LC-Oszillator mit Parallelschwingkreis	1518
26.1.4.2	Zweistufiger Oszillator mit Serienschwingkreis	1522
26.1.4.3	Zusammenfassung der wichtigen Punkte	1524
26.1.5	LC-Oszillatoren mit einstufigen Verstärkern	1525
26.1.5.1	Colpitts-Oszillator in Basisschaltung	1526
26.1.5.2	Colpitts-Oszillator in Kollektorschaltung	1531
26.1.5.3	Colpitts-Oszillator in Emitterschaltung	1537
26.1.5.4	Colpitts-Oszillator mit CMOS-Inverter	1538
26.1.5.5	Colpitts-Oszillator mit Differenzverstärker	1539
26.1.5.6	Eigenschaften integrierter und diskreter Colpitts-Oszillatoren	1541
26.1.5.7	Hartley-Oszillatoren	1543
26.1.5.8	Gegentaktoszillatoren	1544
26.1.5.9	Weitere Oszillatoren	1550
26.2	Oszillatoren mit Leitungen	1552
26.2.1	Leitungsresonatoren	1553
26.2.1.1	Ersatzschaltbild	1553
26.2.1.2	Betriebsbedingungen	1553
26.2.1.3	Berechnung der Elemente	1553
26.2.1.4	Praktische Leitungsresonatoren	1555
26.2.1.5	Leitungsparameter	1559
26.2.2	Schaltungen	1561
26.2.2.1	Oszillatoren mit Leitungsresonatoren	1561
26.2.2.2	Oszillatoren mit dielektrischen Resonatoren	1565
26.3	Quarz-Oszillatoren	1565
26.3.1	Quarz-Resonatoren	1566
26.3.1.1	Ersatzschaltbild	1567
26.3.1.2	Impedanz und Resonanzfrequenzen	1567
26.3.1.3	Frequenzabgleich	1570
26.3.1.4	Verlustleistung	1572
26.3.1.5	Temperaturverhalten	1573
26.3.2	Schaltungen	1573
26.3.2.1	Taktoszillatoren	1574
26.3.2.2	Referenzoszillatoren	1577
26.3.3	Alternative Resonatoren	1583
26.3.3.1	Keramische Resonatoren	1583

26.3.3.2	Oberflächenwellen-Resonatoren	1583
26.4	Frequenzabstimmung	1585
26.4.1	Varaktoren	1586
26.4.1.1	Bipolare Varaktoren	1586
26.4.1.2	MOS-Varaktoren	1586
26.4.1.3	Kleinsignalmodell	1587
26.4.2	Abstimmung	1588
26.4.2.1	Abstimmung eines Parallelschwingkreises	1588
26.4.2.2	Kennlinie	1593
26.4.2.3	Abstimmung eines Serienschwingkreises	1595
26.4.2.4	Breitband-Abstimmung	1595
26.4.2.5	Aussteuerung	1598
26.4.2.6	Modulation	1599
26.5	Amplitudenregelung	1600
26.5.1	Regelung und Begrenzung	1600
26.5.2	Regelmechanismen	1601
26.5.2.1	Regelung über den Ruhestrom	1601
26.5.2.2	Regelung mit Stromteiler	1602
26.5.3	Amplitudenmessung	1603
26.6	Phasenrauschen	1605
26.6.1	Darstellung im Zeit- und im Frequenzbereich	1605
26.6.1.1	Zeitbereich	1605
26.6.1.2	Frequenzbereich	1607
26.6.2	Entstehung	1610
26.6.2.1	Linearer Anteil	1611
26.6.2.2	Modulations- und Konversionsanteil	1614
26.6.3	Frequenzteilung und Frequenzvervielfachung	1615
26.6.4	Betrieb mit einer Phasenregelschleife	1617
26.6.5	Vergleich verschiedener Oszillatoren	1619
27. Phasenregelschleife (PLL)	1621
27.1	Anwendungen	1622
27.1.1	Frequenzsynthese (Synthesizer)	1622
27.1.2	Träger-/Takt-Regeneration (Synchronizer)	1622
27.1.3	Phasen-/Frequenz-Demodulation (Demodulator)	1624
27.2	Analoge PLL	1625
27.2.1	Komponenten	1625
27.2.2	Kennlinie des Mischers als Phasendetektor	1626
27.2.3	Phasendetektor-Konstante des Mischers	1628
27.2.4	Arbeitspunkt des Mischers	1629
27.2.5	Kennlinie des VCOs	1629
27.2.6	VCO-Konstante	1630
27.2.7	Arbeitspunkt der PLL	1630
27.2.8	Regelungstechnisches Kleinsignalersatzschaltbild	1631
27.2.9	Übertragungsfunktionen	1632
27.2.10	Schleifenbandbreite	1633
27.2.11	Wahl der Schleifenbandbreite	1634
27.2.12	Dimensionierung der Beispielschaltung	1634

27.2.13	Verhalten der PLL	1635
27.2.14	Phasenregelung	1638
27.2.15	Übertragungsfunktionen mit PI-Regler	1638
27.2.16	Dimensionierung mit PI-Regler	1640
27.2.17	Verhalten der analogen PLL mit PI-Regler	1645
27.2.18	Zusammenfassung	1647
27.3	Digitale PLL	1648
27.3.1	Digitale PLL mit EXOR-Phasendetektor	1649
27.3.2	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Stromausgang	1652
27.3.3	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Spannungsausgang	1653
27.3.4	Sequentielle Phasendetektoren	1655
27.3.4.1	Flankengetriggelter Phasendetektor	1655
27.3.4.2	Phasen-Frequenz-Detektor	1656
27.3.5	Störtöne	1662
27.3.6	Beispiel für eine digitale PLL mit Phasen-Frequenz-Detektor	1663
27.3.6.1	Kennlinien und Konstanten	1663
27.3.6.2	Dimensionierung des Schleifenfilters	1664
27.3.6.3	Verhalten	1667
27.3.7	Digitale PLL mit Frequenzteilern	1670
27.3.7.1	Blockschaltbild und Kleinsignalersatzschaltbild	1670
27.3.7.2	Kanalwahl und Teilerfaktorsteuerung	1670
27.3.7.3	Momentanwerte und Mittelwerte	1671
27.3.8	Integer-N-PLL	1671
27.3.9	Fractional-N-PLL	1672
27.3.9.1	Steuerbare Frequenzteiler	1672
27.3.9.2	Teilerfaktorsteuerung	1673
27.4	Rauschen	1691
27.4.1	Rauschsignale	1692
27.4.2	Übertragungsfunktionen	1692
27.4.3	Referenzoszillator und VCO	1694
27.4.4	Frequenzteiler	1697
27.4.5	Phasendetektor	1697
27.4.6	Schleifenfilter	1698
27.4.7	Minimierung des Phasenrauschens	1701
28. Anhang		1703
28.1	PSpice-Kurzanleitung	1703
28.1.1	Grundsätzliches	1703
28.1.2	Programme und Dateien	1703
28.1.2.1	Spice	1703
28.1.2.2	PSpice	1703
28.1.3	Ein einfaches Beispiel	1706
28.1.3.1	Eingabe des Schaltplans	1706
28.1.3.2	Simulationsanweisungen eingeben	1711
28.1.3.3	Simulation starten	1714
28.1.3.4	Anzeigen der Ergebnisse	1714
28.1.3.5	Arbeitspunkt anzeigen	1719
28.1.3.6	Netzliste und Ausgabedatei	1720

28.1.4	Weitere Simulationsbeispiele	1722
28.1.4.1	Kennlinien eines Transistors	1722
28.1.4.2	Verwendung von Parametern	1722
28.1.5	Einbinden weiterer Bibliotheken	1726
28.1.6	Einige typische Fehler	1728
28.2	Erklärung der verwendeten Größen	1730
28.3	Typen der 7400-Logik-Familien	1738
28.4	Normwert-Reihen	1745
28.5	Farbcode	1746
Literaturverzeichnis	1749
Sachverzeichnis	1753