

# 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

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

1.4.1.3	Spannungsbegrenzung mit Z-Dioden .....	26
1.4.2	pin-Diode .....	27
1.4.3	Kapazitätsdiode .....	28
1.4.4	Brückengleichrichter .....	30
1.4.5	Mischer .....	31
<b>2.</b>	<b>Bipolartransistor .....</b>	<b>35</b>
2.1	Verhalten eines Bipolartransistors .....	35
2.1.1	Kennlinien .....	36
2.1.1.1	Ausgangskennlinienfeld .....	36
2.1.1.2	Übertragungskennlinienfeld .....	37
2.1.1.3	Eingangskennlinienfeld .....	37
2.1.1.4	Stromverstärkung .....	37
2.1.2	Beschreibung durch Gleichungen .....	37
2.1.2.1	Early-Effekt .....	38
2.1.2.2	Basisstrom und Stromverstärkung .....	38
2.1.2.3	Großsignalgleichungen .....	39
2.1.3	Verlauf der Stromverstärkung .....	39
2.1.3.1	Gummel-Plot .....	39
2.1.3.2	Darstellung des Verlaufs .....	40
2.1.3.3	Bestimmung der Werte .....	41
2.1.4	Arbeitspunkt und Kleinsignalverhalten .....	41
2.1.4.1	Bestimmung des Arbeitspunkts .....	42
2.1.4.2	Kleinsignalgleichungen und Kleinsignalparameter ...	43
2.1.4.3	Kleinsignalersatzschaltbild .....	45
2.1.4.4	Vierpol-Matrizen .....	46
2.1.4.5	Gültigkeitsbereich der Kleinsignalbetrachtung .....	46
2.1.5	Grenzdaten und Sperrströme .....	47
2.1.5.1	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
<b>3.</b>	<b>Feldeffekttransistor .....</b>	<b>177</b>
3.1	Verhalten eines Feldeffekttransistors .....	178
3.1.1	Kennlinien .....	180
3.1.1.1	Ausgangskennlinienfeld .....	180
3.1.1.2	Abschnürbereich .....	180
3.1.1.3	Übertragungskennlinienfeld .....	182
3.1.1.4	Eingangskennlinien .....	182
3.1.2	Beschreibung durch Gleichungen .....	183
3.1.2.1	Verlauf der Kennlinien .....	184
3.1.2.2	Steilheitskoeffizient .....	185
3.1.2.3	Alternative Darstellung .....	186
3.1.2.4	Kanallängenmodulation .....	186
3.1.3	Feldeffekttransistor als steuerbarer Widerstand .....	187
3.1.4	Arbeitspunkt und Kleinsignalverhalten .....	189
3.1.4.1	Arbeitspunkt .....	189
3.1.4.2	Kleinsignalgleichungen und Kleinsignalparameter ...	190
3.1.4.3	Kleinsignalersatzschaltbild .....	192
3.1.4.4	Vierpol-Matrizen .....	192
3.1.4.5	Gültigkeitsbereich der Kleinsignalbetrachtung .....	192
3.1.5	Grenzdaten und Sperrströme .....	193
3.1.5.1	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
<b>4.</b>	<b>Verstärker .....</b>	<b>279</b>
4.1	Schaltungen .....	281
4.1.1	Grundlagen .....	281
4.1.1.1	Kennlinien der Transistoren .....	281
4.1.1.2	Skalierung .....	282
4.1.1.3	Normierung .....	282
4.1.1.4	Komplementäre Transistoren .....	283
4.1.1.5	Auswirkung fertigungsbedingter Toleranzen .....	284
4.1.1.6	Dioden .....	285
4.1.2	Stromquellen und Stromspiegel .....	287
4.1.2.1	Prinzip einer Stromquelle .....	287
4.1.2.2	Einfache Stromquellen für diskrete Schaltungen .....	290
4.1.2.3	Einfacher Stromspiegel .....	292
4.1.2.4	Stromspiegel mit Kaskode .....	304
4.1.2.5	Kaskode-Stromspiegel .....	308
4.1.2.6	Wilson-Stromspiegel .....	314
4.1.2.7	Dynamisches Verhalten .....	316
4.1.2.8	Weitere Stromspiegel und Stromquellen .....	317
4.1.2.9	Stromspiegel für diskrete Schaltungen .....	324
4.1.3	Kaskodeschaltung .....	325
4.1.3.1	Kleinsignalverhalten der Kaskodeschaltung .....	326
4.1.3.2	Frequenzgang und Grenzfrequenz der Kaskodeschaltung .....	330
4.1.4	Differenzverstärker .....	339
4.1.4.1	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.	<b>Operationsverstärker</b> .....	<b>509</b>
5.1	Übersicht .....	509
5.1.1	Operationsverstärker-Typen .....	511
5.1.2	Prinzip der Gegenkopplung .....	513
5.1.2.1	Der nichtinvertierende Verstärker .....	514
5.1.2.2	Der invertierende Verstärker .....	516
5.2	Der normale Operationsverstärker (VV-OPV) .....	518



5.2.1	Das Prinzip .....	519
5.2.2	Universalverstärker .....	521
5.2.3	Betriebsspannungen .....	523
5.2.4	Single-Supply-Verstärker .....	525
5.2.4.1	Phasenumkehr .....	526
5.2.5	Rail-to-Rail-Verstärker .....	527
5.2.6	Breitband-Operationsverstärker .....	531
5.2.7	Frequenzgang-Korrektur .....	536
5.2.7.1	Grundlagen .....	536
5.2.7.2	Universelle Frequenzgang-Korrektur .....	539
5.2.7.3	Pole-Splitting .....	540
5.2.7.4	Angepasste Frequenzgangkorrektur .....	541
5.2.7.5	Slew-Rate .....	542
5.2.7.6	Kapazitive Last .....	545
5.2.7.7	Interne Lastkorrektur .....	548
5.2.7.8	Zweipolige Frequenzgangkorrektur .....	549
5.2.8	Parameter von Operationsverstärkern .....	550
5.2.8.1	Differenz- und Gleichtaktverstärkung .....	551
5.2.8.2	Offsetspannung .....	554
5.2.8.3	Eingangsströme .....	556
5.2.8.4	Eingangswiderstände .....	558
5.2.8.5	Ausgangswiderstand .....	559
5.2.8.6	Beispiel für statische Fehler .....	560
5.2.8.7	Bandbreite .....	562
5.2.8.8	Rauschen .....	564
5.3	Der Transkonduktanz-Verstärker (VC-OPV) .....	568
5.3.1	Innerer Aufbau .....	568
5.3.2	Typische Anwendung .....	571
5.4	Der Transimpedanzverstärker (CV-OPV) .....	572
5.4.1	Innerer Aufbau .....	572
5.4.2	Frequenzverhalten .....	575
5.4.3	Typische Anwendungen .....	579
5.5	Der Strom-Verstärker (CC-OPV) .....	580
5.5.1	Innerer Aufbau .....	580
5.5.2	Typische Anwendung .....	582
5.5.2.1	Anwendungen mit Stromgegenkopplung .....	582
5.5.2.2	Anwendungen mit Spannungsgegenkopplung .....	586
5.6	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
<b>6.</b>	<b>Digitaltechnik Grundlagen .....</b>	<b>613</b>
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
<b>7.</b>	<b>Schaltnetze (Kombinatorische Logik) .....</b>	<b>647</b>
7.1	Multiplexer .....	648

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
<b>8.</b>	<b>Schaltwerke (Sequentielle Logik) .....</b>	<b>673</b>
8.1	Flip-Flops .....	673
8.1.1	Transparente Flip-Flops .....	674
8.1.1.1	Flip-Flop Grundsaltung .....	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	Vorwählzähler .....	690
8.5	Schieberegister .....	692
8.5.1	Grundschialtung .....	692
8.5.2	Schieberegister mit Paralleleingabe .....	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
<b>9.</b>	<b>Halbleiterspeicher .....</b>	<b>707</b>
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	Standart FIFOs .....	733
9.4.3	FIFO-Realisierung mit Standard-RAMs .....	734

## **Teil II. Anwendungen**

<b>10.</b>	<b>Analogrechenschaltungen .....</b>	<b>739</b>
10.1	Addierer .....	739
10.2	Subtrahierer .....	740
10.2.1	Rückführung auf die Addition .....	740
10.2.2	Subtrahierer mit einem Operationsverstärker .....	741

10.3	Bipolares Koeffizientenglied .....	743
10.4	Integratoren .....	744
10.4.1	Invertierender Integrator .....	744
10.4.2	Anfangsbedingung .....	747
10.4.3	Summationsintegrator .....	748
10.4.4	Nicht invertierender Integrator .....	748
10.4.5	Integrator für hohe Frequenzen .....	749
10.5	Differentiatoren .....	751
10.5.1	Prinzipschaltung .....	751
10.5.2	Praktische Realisierung .....	751
10.5.3	Differentiator mit hohem Eingangswiderstand .....	752
10.6	Lösung von Differentialgleichungen .....	753
10.7	Funktionsnetzwerke .....	755
10.7.1	Logarithmus .....	755
10.7.2	Exponentialfunktion .....	758
10.7.3	Bildung von Potenzfunktionen über Logarithmen .....	760
10.8	Analog-Multiplizierer .....	760
10.8.1	Multiplizierer mit logarithmierenden Funktionsgeneratoren ...	760
10.8.2	Steilheitsmultiplizierer .....	761
<b>11.</b>	<b>Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter .....</b>	<b>767</b>
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
<b>12.</b>	<b>Aktive Filter .....</b>	<b>787</b>
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
<b>13.</b>	<b>Signalgeneratoren .....</b>	<b>847</b>
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
<b>14.</b>	<b>Leistungsverstärker .....</b>	<b>863</b>
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 Leistungsstufe .....	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
<b>15.</b>	<b>Stromversorgung .....</b>	<b>889</b>
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	Grundsaltung .....	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	Sepic 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
<b>16. DA- und AD-Umsetzer</b>		<b>963</b>
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
<b>17.</b>	<b>Messschaltungen .....</b>	<b>1009</b>
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	Synchrone Gleichrichter .....	1031
<b>18.</b>	<b>Sensorik .....</b>	<b>1037</b>
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
<b>19.</b>	<b>Elektronische Regler .....</b>	<b>1081</b>
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	Nachlaufsynchrisation (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
<b>20.</b>	<b>Optoelektronische Bauelemente .....</b>	<b>1105</b>
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

<b>21. Grundlagen .....</b>	<b>1127</b>
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
<b>22.</b>	<b>Sender und Empfänger .....</b>	<b>1217</b>
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 Lokalszillatorfrequenzen .....	1223
22.2	Empfänger .....	1225
22.2.1	Geradeausempfänger .....	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 Lokalszillatorfrequenzen .....	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

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
<b>23.</b>	<b>Passive Komponenten .....</b>	<b>1267</b>
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-Filter .....	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
<b>24.</b>	<b>Hochfrequenz-Verstärker .....</b>	<b>1305</b>
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 rauscharmer 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
<b>25.</b>	<b>Mischer . . . . .</b>	<b>1371</b>

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	Mischverstärkung .....	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 Gegentaktmischers 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	Kenngößen .....	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
<b>26.</b>	<b>Oszillatoren .....</b>	<b>1487</b>
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	Gegentaktoszillatoren .....	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 .....	1543
26.2.2	Schaltungen .....	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 phasenstarken Schleife .....	1601
26.6.5	Vergleich verschiedener Oszillatoren .....	1603
<b>27.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>1605</b>
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
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>1669</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>		<b>1673</b>