

# 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 .....	735
11. Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter .....	763
12. Aktive Filter .....	785
13. Regler .....	845
14. Signalgeneratoren .....	865
15. Leistungsverstärker .....	881
16. Stromversorgung .....	907
17. DA- und AD-Umsetzer .....	991
18. Messschaltungen .....	1037
19. Sensorik .....	1069
20. Optoelektronische Bauelemente .....	1113

## Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik

---

21. Grundlagen .....	1137
22. Sender und Empfänger .....	1227
23. Passive Komponenten .....	1277
24. Hochfrequenz-Verstärker .....	1315
25. Mischer .....	1381
26. Oszillatoren .....	1497
27. Phasenregelschleife (PLL) .....	1615
28. Anhang .....	1697
Literaturverzeichnis .....	1763
Sachverzeichnis .....	1767

# 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	Sperschichtkapazitäten.....	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
<b>5.</b>	<b>Operationsverstärker .....</b>	<b>509</b>
5.1	Übersicht .....	509
5.1.1	Operationsverstärker-Typen .....	511
5.1.2	Prinzip der Gegenkopplung .....	513
5.1.2.1	Der nichtinvertierende Verstärker .....	514
5.1.2.2	Der invertierende Verstärker .....	516
5.2	Der normale Operationsverstärker (VV-OPV) .....	518



5.2.1	Das Prinzip .....	519
5.2.2	Universalverstärker .....	521
5.2.3	Betriebsspannungen .....	523
5.2.4	Single-Supply-Verstärker .....	525
5.2.4.1	Phasenumkehr .....	526
5.2.5	Rail-to-Rail-Verstärker .....	527
5.2.6	Breitband-Operationsverstärker .....	531
5.2.7	Frequenzgang-Korrektur .....	536
5.2.7.1	Grundlagen .....	536
5.2.7.2	Universelle Frequenzgang-Korrektur .....	539
5.2.7.3	Pole-Splitting .....	540
5.2.7.4	Angepasste Frequenzgangkorrektur .....	541
5.2.7.5	Slew-Rate .....	542
5.2.7.6	Kapazitive Last .....	545
5.2.7.7	Interne Lastkorrektur .....	548
5.2.7.8	Zweipolige Frequenzgangkorrektur .....	549
5.2.8	Parameter von Operationsverstärkern .....	550
5.2.8.1	Differenz- und Gleichtaktverstärkung .....	551
5.2.8.2	Offsetspannung .....	554
5.2.8.3	Eingangsströme .....	556
5.2.8.4	Eingangswiderstände .....	558
5.2.8.5	Ausgangswiderstand .....	559
5.2.8.6	Beispiel für statische Fehler .....	560
5.2.8.7	Bandbreite .....	562
5.2.8.8	Rauschen .....	564
5.3	Der Transkonduktanz-Verstärker (VC-OPV) .....	568
5.3.1	Innerer Aufbau .....	568
5.3.2	Typische Anwendung .....	571
5.4	Der Transimpedanzverstärker (CV-OPV) .....	572
5.4.1	Innerer Aufbau .....	572
5.4.2	Frequenzverhalten .....	575
5.4.3	Typische Anwendungen .....	579
5.5	Der Strom-Verstärker (CC-OPV) .....	580
5.5.1	Innerer Aufbau .....	580
5.5.2	Typische Anwendung .....	582
5.5.2.1	Anwendungen mit Stromgegenkopplung .....	582
5.5.2.2	Anwendungen mit Spannungsgegenkopplung .....	586
5.6	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	Vorwahlzähler .....	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	Synchrone Zeitschalter .....	698
8.6.5	Synchrone Änderungsdetektor .....	700
8.6.6	Synchrone 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 .....	711
9.1.2.1	Typenübersicht .....	713
9.1.3	Computer-gestützter PLD-Entwurf .....	714
9.2	Datenspeicher .....	715
9.2.1	Statische RAMs .....	718
9.2.1.1	Zeitbedingungen .....	718
9.2.2	Dynamische RAMs .....	719
9.2.3	Flash Speicher .....	724
9.3	Fehler-Erkennung und -Korrektur .....	726
9.3.1	Paritätsbit .....	726
9.3.2	Hamming-Code .....	727
9.4	First-In-First-Out Memories (FIFO) .....	729
9.4.1	Prinzip .....	729
9.4.2	Standart FIFOs .....	730
9.4.3	FIFO-Realisierung mit Standard-RAMs .....	731

## Teil II. Anwendungen

---

<b>10.</b>	<b>Analogrechenhaltungen .....</b>	<b>735</b>
10.1	Addierer .....	735
10.2	Subtrahierer .....	736
10.2.1	Rückführung auf die Addition .....	736
10.2.2	Subtrahierer mit einem Operationsverstärker .....	737
10.3	Bipolares Koeffizientenglied .....	739

10.4	Integratoren	740
10.4.1	Invertierender Integrator	740
10.4.2	Anfangsbedingung	743
10.4.3	Summationsintegrator	744
10.4.4	Nicht invertierender Integrator	744
10.4.5	Integrator für hohe Frequenzen	745
10.5	Differentiatoren	747
10.5.1	Prinzipschaltung	747
10.5.2	Praktische Realisierung	747
10.5.3	Differentiator mit hohem Eingangswiderstand	748
10.6	Lösung von Differentialgleichungen	749
10.7	Funktionsnetzwerke	751
10.7.1	Logarithmus	751
10.7.2	Exponentialfunktion	754
10.7.3	Bildung von Potenzfunktionen über Logarithmen	756
10.8	Analog-Multiplizierer	757
10.8.1	Multiplizierer mit logarithmierenden Funktionsgeneratoren	757
10.8.2	Steilheitsmultiplizierer	758
<b>11.</b>	<b>Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter</b>	<b>763</b>
11.1	Spannungsgesteuerte Spannungsquellen	763
11.1.1	Ideale Spannungsquelle	764
11.1.2	Spannungsquelle mit negativem Ausgangswiderstand	765
11.2	Stromgesteuerte Spannungsquellen	766
11.3	Spannungsgesteuerte Stromquellen	767
11.3.1	Stromquellen für potentialfreie Verbraucher	767
11.3.2	Stromquellen für geerdete Verbraucher	769
11.3.3	Transistor-Präzisionsstromquellen	770
11.3.3.1	Transistor-Stromquellen für bipolare Ausgangsströme	772
11.3.4	Schwimmende Stromquellen	775
11.4	Stromgesteuerte Stromquellen	776
11.5	Der NIC (Negative Impedance Converter)	776
11.6	Der Gyrator	779
11.6.1	Transformation von Zweipolen	780
11.6.2	Transformation von Vierpolen	781
11.7	Der Zirkulator	782
<b>12.</b>	<b>Aktive Filter</b>	<b>785</b>
12.1	Theoretische Grundlagen von Tiefpassfiltern	785
12.1.1	Butterworth-Tiefpässe	790
12.1.2	Tschebyscheff-Tiefpässe	792
12.1.3	Bessel-Tiefpässe	795
12.1.4	Zusammenfassung der Theorie	798
12.2	Tiefpass-Hochpass-Transformation	806
12.3	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 1. Ordnung	806
12.4	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 2. Ordnung	808
12.4.1	LRC-Filter	808
12.4.2	Filter mit Mehrfachgegenkopplung	809
12.4.3	Filter mit Einfachmitkopplung	810

12.5	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern höherer Ordnung . . . . .	812
12.6	Tiefpass-Bandpass-Transformation . . . . .	814
12.6.1	Bandpassfilter 2. Ordnung . . . . .	815
12.6.2	Bandpassfilter 4. Ordnung . . . . .	816
12.7	Realisierung von Bandpassfiltern 2. Ordnung . . . . .	818
12.7.1	LRC-Filter . . . . .	819
12.7.2	Bandpass mit Mehrfachgegenkopplung . . . . .	820
12.7.3	Bandpass mit Einfachmitkopplung . . . . .	821
12.8	Tiefpass-Bandsperren-Transformation . . . . .	822
12.9	Realisierung von Sperrfiltern 2. Ordnung . . . . .	823
12.9.1	LRC-Sperrfilter . . . . .	823
12.9.2	Aktive Doppel-T-Bandsperre . . . . .	824
12.9.3	Aktive Wien–Robinson-Bandsperre . . . . .	824
12.10	Allpässe . . . . .	825
12.10.1	Grundlagen . . . . .	825
12.10.2	Realisierung von Allpässen 1. Ordnung . . . . .	828
12.10.3	Realisierung von Allpässen 2. Ordnung . . . . .	828
12.11	Integratorfilter . . . . .	830
12.11.1	Grundschtaltung . . . . .	830
12.11.2	Integratorfilter für hohe Frequenzen . . . . .	831
12.11.3	Integratorfilter mit zusätzlichem Hochpass-Ausgang . . . . .	831
12.11.4	Integratorfilter mit zusätzlichem Bandsperren-Ausgang . . . . .	832
12.11.5	Elektronische Steuerung der Filterparameter . . . . .	833
12.11.6	Filter mit einstellbaren Koeffizienten . . . . .	836
12.12	Switched-Capacitor-Filter . . . . .	838
12.12.1	Grundprinzip . . . . .	838
12.12.2	Der SC-Integrator . . . . .	839
12.12.3	SC-Filter 1. Ordnung . . . . .	840
12.12.4	SC-Filter 2. Ordnung . . . . .	841
12.12.5	Integrierte Realisierung von SC-Filtern . . . . .	842
12.12.6	Allgemeine Gesichtspunkte beim Einsatz von SC-Filtern . . . . .	842
12.12.7	Typenübersicht . . . . .	843
<b>13.</b>	<b>Regler . . . . .</b>	<b>845</b>
13.1	Grundlagen . . . . .	845
13.1.1	Komponenten eines Regelkreises . . . . .	846
13.1.2	Beispielstrecke . . . . .	847
13.2	Regler-Typen . . . . .	848
13.2.1	P-Regler . . . . .	849
13.2.2	PI-Regler . . . . .	850
13.2.3	PID-Regler . . . . .	852
13.2.4	Kompensator . . . . .	855
13.2.5	Realisierung der Regler . . . . .	857
13.3	Regelung nichtlinearer Strecken . . . . .	860
13.3.1	Statische Nichtlinearität . . . . .	860
13.3.2	Dynamische Nichtlinearität . . . . .	862
<b>14.</b>	<b>Signalgeneratoren . . . . .</b>	<b>865</b>
14.1	Rechteckformung . . . . .	865

14.1.1	Komparator	865
14.1.1.1	Fensterkomparator	867
14.1.2	Schmitt-Trigger	867
14.2	Impulserzeugung	869
14.2.1	Erzeugung kurzer Impulse	869
14.2.2	Erzeugung längerer Impulse	870
14.3	Rechteckgeneratoren	872
14.3.1	Funktionsgeneratoren	872
14.3.2	Einfache Rechteckgeneratoren	875
14.3.2.1	Timer als Schmitt-Trigger	875
14.3.2.2	Operationsverstärker als Schmitt-Trigger	876
14.3.2.3	Gatter als Schmitt-Trigger	877
14.3.3	Rechteckgeneratoren mit hoher Frequenzgenauigkeit	878
14.4	Sinusschwingungen	878
14.4.1	Arbiträrgenerator	878
14.4.2	Direkte Digitale Synthese	879
<b>15.</b>	<b>Leistungsverstärker</b>	<b>881</b>
15.1	Emitterfolger als Leistungsverstärker	881
15.2	Komplementäre Emitterfolger	883
15.2.1	Komplementäre Emitterfolger in B-Betrieb	883
15.2.2	Komplementäre Emitterfolger in AB-Betrieb	886
15.2.3	Erzeugung der Vorspannung	887
15.3	Komplementäre Darlington-Schaltungen	887
15.4	Komplementäre Drainschaltungen	889
15.5	Komplementäre Sourceschaltungen	890
15.6	Strombegrenzung	891
15.6.0.1	Spannungsabhängige Strombegrenzung	892
15.7	Vier-Quadranten-Betrieb	893
15.8	Dimensionierung einer Leistungsendstufe	895
15.9	Ansteuerschaltungen mit Spannungsverstärkung	897
15.9.1	Breitband-Ansteuerschaltung	897
15.10	Erhöhung des Ausgangsstromes integrierter Operationsverstärker	899
15.11	Eine Betriebsspannung	900
15.11.1	Wechselspannungskopplung	900
15.11.2	Brückenschaltung	901
15.12	Getaktete Leistungsverstärker	903
<b>16.</b>	<b>Stromversorgung</b>	<b>907</b>
16.1	Eigenschaften von Netztransformatoren	909
16.2	Netzgleichrichter	910
16.2.1	Einweggleichrichter	910
16.2.2	Brückengleichrichter	911
16.2.3	Mittelpunkt-Schaltung	915
16.2.3.1	Grundschtaltung	915
16.2.3.2	Doppelte Mittelpunktschaltung	916
16.3	Lineare Spannungsregler	916
16.3.1	Prinzipien	917
16.3.2	Praktische Ausführung	917

16.3.3	Einstellung der Ausgangsspannung .....	919
16.3.4	Spannungsregler mit geringem Spannungsverlust .....	920
16.3.5	Spannungsregler für negative Spannungen .....	921
16.3.6	Labornetzgeräte .....	922
16.3.7	Integrierte Spannungsregler .....	923
16.4	Erzeugung der Referenzspannung .....	924
16.4.1	Referenzspannungsquellen mit Z-Dioden .....	924
16.4.2	Bandabstands-Referenz .....	926
16.4.3	Typenübersicht .....	928
16.5	Schaltregler ohne Potentialtrennung .....	929
16.5.1	Der Abwärts-Wandler .....	931
16.5.1.1	Prinzip .....	931
16.5.1.2	Ausführungsbeispiel .....	933
16.5.1.3	Leistungsschalter .....	934
16.5.1.4	Pulsbreitenmodulation .....	936
16.5.1.5	Pulsfrequenzmodulation .....	940
16.5.2	Aufwärts-Wandler .....	941
16.5.3	Invertierender Wandler .....	942
16.5.4	Aufwärts- Abwärts wandler .....	943
16.5.5	Sepic Konverter .....	944
16.5.6	Spannungswandler mit Ladungspumpe .....	946
16.5.7	Typenübersicht .....	948
16.6	Schaltregler mit Potentialtrennung .....	949
16.6.1	Eintakt-Wandler .....	949
16.6.1.1	Eintakt-Sperrwandler .....	949
16.6.1.2	Eintakt-Durchflusswandler .....	952
16.6.2	Gegentakt-Wandler .....	954
16.6.2.1	Gegentakt-Wandler mit Parallelspeisung .....	954
16.6.2.2	Gegentakt-Wandler in Halbbrückenschaltung .....	955
16.6.2.3	Gegentakt-Wandler in Brückenschaltung .....	957
16.6.3	Resonanzumrichter .....	960
16.6.4	Aktive Gleichrichtung .....	960
16.6.5	Leistungsschalter .....	963
16.6.5.1	Leistungstransistoren .....	963
16.6.5.2	Gatetreiber ohne Potentialtrennung .....	967
16.6.5.3	Gatetreiber mit Potentialtrennung .....	970
16.6.6	Integrierte Gatetreiber .....	973
16.6.7	Hochfrequenztransformatoren .....	974
16.6.8	Verlustanalyse .....	976
16.7	Leistungsfaktorkorrektur .....	977
16.8	Solarwechselrichter .....	980
16.9	Unterbrechungsfreie Stromversorgung .....	983
16.10	Stromversorgung mit Akkus .....	985
16.10.1	Akkutechnologien .....	985
16.10.2	Entladung .....	985
16.10.3	Ladung .....	986
16.10.4	Ladegerät .....	988



---

<b>17. DA- und AD-Umsetzer</b> .....	<b>991</b>
17.1 Systemtheoretische Grundlagen .....	992
17.1.1 Quantisierung der Zeit .....	992
17.1.1.1 Abtasttheorem .....	992
17.1.1.2 Rückgewinnung des Analogsignals .....	994
17.1.1.3 Praktische Gesichtspunkte .....	994
17.1.2 Quantisierung der Amplitude .....	997
17.1.3 Spannungseinheit .....	998
17.2 Digital-Analog Umsetzung .....	998
17.2.1 Grundprinzipien der DA-Umsetzung .....	998
17.2.2 Wägeverfahren mit geschalteten Spannungen .....	999
17.2.2.1 Einsatz von Wechselschaltern .....	1000
17.2.2.2 Leiternetzwerk .....	1001
17.2.2.3 Inversbetrieb eines Leiternetzwerks .....	1002
17.2.3 Wägeverfahren mit geschalteten Strömen .....	1003
17.2.4 DA-Umsetzer für spezielle Anwendungen .....	1004
17.2.4.1 Verarbeitung vorzeichenbehafteter Zahlen .....	1004
17.2.4.2 Multiplizierende DA-Umsetzer .....	1006
17.2.4.3 Dividierende DA-Umsetzer .....	1007
17.2.5 Genauigkeit von DA-Umsetzern .....	1007
17.2.5.1 Statische Kenngrößen .....	1007
17.2.5.2 Glitche .....	1007
17.2.5.3 Typen .....	1008
17.3 Analog-Digital Umsetzer .....	1010
17.3.1 Parallelverfahren .....	1010
17.3.2 Pipelineumsetzer .....	1013
17.3.3 Wägeverfahren .....	1016
17.3.4 Zählverfahren .....	1019
17.3.4.1 Modifiziertes Wägeverfahren .....	1019
17.3.4.2 Dual-Slope-Verfahren .....	1020
17.3.5 Überabtastung .....	1022
17.3.6 Delta-Sigma-Verfahren .....	1023
17.3.7 Genauigkeit von AD-Umsetzern .....	1028
17.3.7.1 Statische Fehler .....	1028
17.3.7.2 Dynamische Fehler .....	1029
17.3.7.3 Vergleich der Verfahren .....	1030
17.4 Abtast-Halte-Glieder .....	1031
17.4.1 Grundlagen .....	1031
17.4.2 Transmission-Gate als Schalter .....	1033
17.4.3 Dioden-Brücke als Schalter .....	1034
<b>18. Messschaltungen</b> .....	<b>1037</b>
18.1 Spannungsmessung .....	1037
18.1.1 Impedanzwandler .....	1037
18.1.1.1 Vergrößerung der Spannungsaussteuerbarkeit .....	1037
18.1.2 Messung von Potentialdifferenzen .....	1038
18.1.2.1 Subtrahierer mit beschalteten Operationsverstärkern ..	1038
18.1.2.2 Subtrahierer für hohe Spannungen .....	1040

18.1.2.3	Subtrahierer mit gegengekoppelten Differenzverstärkern .....	1041
18.1.2.4	Subtrahierer in SC-Technik .....	1042
18.1.3	Trennverstärker (Isolation Amplifier) .....	1043
18.2	Strommessung .....	1046
18.2.1	Strommessung mit Shunts .....	1046
18.2.2	Potentialfreies Amperemeter mit niedrigem Spannungsabfall ..	1049
18.2.3	Strommessung auf hohem Potential .....	1050
18.2.4	Strommessung über das Magnetfeld .....	1050
18.3	Messgleichrichter (AC/DC-Converter) .....	1053
18.3.1	Messung des Betragsmittelwertes .....	1053
18.3.1.1	Vollweggleichrichter mit geerdetem Ausgang .....	1054
18.3.1.2	Gleichrichtung durch Umschalten des Vorzeichens ...	1055
18.3.1.3	Breitband-Vollweggleichrichter .....	1056
18.3.2	Messung des Effektivwertes .....	1057
18.3.2.1	Echte Effektivwertmessung (True RMS) .....	1058
18.3.2.2	Leistungsmesser .....	1060
18.3.3	Messung des Scheitelwertes .....	1061
18.3.3.1	Momentane Scheitelwertmessung .....	1063
18.3.4	Synchrone Gleichrichter .....	1064
<b>19.</b>	<b>Sensorik .....</b>	<b>1069</b>
19.1	Temperaturmessung .....	1069
19.1.1	Kaltleiter auf Silizium-Basis, PTC-Sensoren .....	1072
19.1.2	Heißeleiter, NTC-Sensoren .....	1076
19.1.3	Metalle als Kaltleiter, PTC-Sensoren .....	1077
19.1.4	Transistor als Temperatursensor .....	1078
19.1.5	Das Thermoelement .....	1081
19.1.6	Typenübersicht .....	1086
19.2	Druckmessung .....	1086
19.2.1	Aufbau von Drucksensoren .....	1087
19.2.2	Betrieb temperaturkompensierter Drucksensoren .....	1088
19.2.3	Temperaturkompensation von Drucksensoren .....	1091
19.2.4	Handelsübliche Drucksensoren .....	1092
19.3	Feuchtemessung .....	1093
19.3.1	Feuchtesensoren .....	1094
19.3.2	Betriebsschaltungen für kapazitive Feuchtesensoren .....	1094
19.4	Drehwinkelkodierer .....	1096
19.5	Übertragung von Sensorsignalen .....	1100
19.5.1	Galvanisch gekoppelte Signalübertragung .....	1100
19.5.2	Galvanisch getrennte Signalübertragung .....	1103
19.6	Kalibrierung von Sensorsignalen .....	1104
19.6.1	Kalibrierung des Analogsignals .....	1105
19.6.2	Computer-gestützte Kalibrierung .....	1108
<b>20.</b>	<b>Optoelektronische Bauelemente .....</b>	<b>1113</b>
20.1	Fotometrische Grundbegriffe .....	1113
20.2	Leuchtdioden .....	1116
20.3	Fotodiode .....	1118

20.3.1	Fotozellen als Empfänger .....	1119
20.3.2	Fotozellen zur Energiegewinnung .....	1120
20.4	Fototransistor .....	1121
20.5	Optokoppler .....	1121
20.6	Optische Anzeige .....	1122
20.6.1	Flüssigkristallanzeigen .....	1122
20.6.2	Binär-Anzeige .....	1123
20.6.3	Analog-Anzeige .....	1125
20.6.4	Numerische Anzeige .....	1126
20.6.5	Multiplex Anzeige .....	1128
20.6.6	Alpha-Numerische Anzeige .....	1129
20.6.6.1	16-Segment-Anzeigen .....	1129
20.6.6.2	35-Punktmatrix-Anzeigen .....	1130

### Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik

<b>21. Grundlagen .....</b>	<b>1137</b>
21.1 Nachrichtentechnische Systeme .....	1137
21.2 Übertragungskanäle .....	1140
21.2.1 Leitung .....	1140
21.2.1.1 Feldwellenwiderstand und Ausbreitungsgeschwindigkeit .....	1141
21.2.1.2 Leitungswellenwiderstand .....	1141
21.2.1.3 Leitungsgleichung .....	1142
21.2.1.4 Dämpfung .....	1145
21.2.1.5 Kenngrößen einer Leitung .....	1146
21.2.1.6 Vierpoldarstellung einer Leitung .....	1147
21.2.1.7 Leitung mit Abschluss .....	1148
21.2.1.8 Streifenleitung .....	1150
21.2.2 Drahtlose Verbindung .....	1151
21.2.2.1 Antennen .....	1151
21.2.2.2 Leistungsübertragung über eine drahtlose Verbindung .....	1154
21.2.2.3 Frequenzbereiche .....	1155
21.2.3 Faseroptische Verbindung .....	1156
21.2.3.1 Lichtwellenleiter .....	1157
21.2.3.2 Wellenlängenbereiche .....	1160
21.2.4 Vergleich der Übertragungskanäle .....	1161
21.3 Reflexionsfaktor und S-Parameter .....	1162
21.3.1 Wellengrößen .....	1162
21.3.1.1 Darstellung mit Hilfe von Spannung und Strom .....	1163
21.3.2 Reflexionsfaktor .....	1164
21.3.2.1 Reflexionsfaktor-Ebene ( $r$ -Ebene) .....	1164
21.3.2.2 Einfluss einer Leitung auf den Reflexionsfaktor .....	1165
21.3.2.3 Stehwellenverhältnis .....	1167
21.3.3 Wellenquelle .....	1170
21.3.3.1 Unabhängige Welle einer Wellenquelle .....	1170
21.3.3.2 Verfügbare Leistung .....	1170
21.3.4 S-Parameter .....	1171

21.3.4.1	S-Matrix .....	1171
21.3.4.2	Messung der S-Parameter .....	1174
21.3.4.3	Zusammenhang mit den Y-Parametern .....	1174
21.3.4.4	S-Parameter eines Transistors .....	1174
21.3.4.5	Ortskurven .....	1176
21.4	Modulationsverfahren .....	1178
21.4.1	Amplitudenmodulation .....	1182
21.4.1.1	Darstellung im Zeitbereich .....	1183
21.4.1.2	Darstellung im Frequenzbereich .....	1185
21.4.1.3	Modulation .....	1186
21.4.1.4	Demodulation .....	1187
21.4.2	Frequenzmodulation .....	1190
21.4.2.1	Darstellung im Zeitbereich .....	1191
21.4.2.2	Darstellung im Frequenzbereich .....	1192
21.4.2.3	Modulation .....	1195
21.4.2.4	Demodulation .....	1195
21.4.3	Digitale Modulationsverfahren .....	1198
21.4.3.1	Einfache Tastverfahren .....	1198
21.4.3.2	I/Q-Darstellung digitaler Modulationsverfahren .....	1201
21.4.3.3	Impulsformung .....	1208
21.4.3.4	Ein einfacher QPSK-Modulator .....	1213
21.5	Mehrfachnutzung und Gruppierung von Kanälen .....	1216
21.5.1	Multiplex-Verfahren .....	1216
21.5.1.1	Frequenzmultiplex .....	1216
21.5.1.2	Zeitmultiplex .....	1217
21.5.1.3	Codemultiplex .....	1218
21.5.2	Duplex-Verfahren .....	1224
21.5.2.1	Frequenzduplex .....	1224
21.5.2.2	Zeitduplex .....	1224
<b>22. Sender und Empfänger .....</b>		<b>1227</b>
22.1	Sender .....	1227
22.1.1	Sender mit analoger Modulation .....	1227
22.1.1.1	Sender mit direkter Modulation .....	1227
22.1.1.2	Sender mit einer Zwischenfrequenz .....	1227
22.1.1.3	Sender mit zwei Zwischenfrequenzen .....	1230
22.1.1.4	Sender mit variabler Sendefrequenz .....	1232
22.1.2	Sender mit digitaler Modulation .....	1232
22.1.3	Erzeugung der Lokalszillatorfrequenzen .....	1233
22.2	Empfänger .....	1235
22.2.1	Geradeusempfänger .....	1235
22.2.2	Überlagerungsempfänger .....	1236
22.2.2.1	HF-Filter .....	1237
22.2.2.2	Vorverstärker .....	1238
22.2.2.3	Vorselektion .....	1239
22.2.2.4	ZF-Filter .....	1239
22.2.2.5	Überlagerungsempfänger mit zwei Zwischenfrequenzen .....	1240

22.2.2.6	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen .....	1241
22.2.3	Verstärkungsregelung .....	1242
22.2.3.1	Regelverhalten .....	1243
22.2.3.2	Regelbarer Verstärker (VGA) .....	1245
22.2.3.3	Anordnung der Verstärkungsregelung im Empfänger .	1247
22.2.3.4	Pegeldetektion .....	1247
22.2.3.5	Digitale Verstärkungsregelung .....	1248
22.2.4	Dynamikbereich eines Empfängers .....	1249
22.2.4.1	Rauschzahl des Empfängers .....	1251
22.2.4.2	Minimaler Empfangspegel .....	1252
22.2.4.3	Maximaler Empfangspegel .....	1253
22.2.4.4	Dynamikbereich .....	1254
22.2.5	Empfänger für digitale Modulationsverfahren .....	1259
22.2.5.1	Empfänger mit digitalen Kanalfiltern .....	1261
22.2.5.2	Empfänger mit ZF-Abtastung und digitalen Kanalfiltern .....	1266
22.2.5.3	Vergleich der Empfänger für digitale Modulationsverfahren .....	1270
22.2.5.4	Direktumsetzender Empfänger .....	1271
<b>23.</b>	<b>Passive Komponenten .....</b>	<b>1277</b>
23.1	Hochfrequenz-Ersatzschaltbilder .....	1277
23.1.1	Widerstand .....	1278
23.1.2	Spule .....	1279
23.1.3	Kondensator .....	1282
23.2	Filter .....	1283
23.2.1	LC-Filter .....	1284
23.2.1.1	Zweikreisiges Bandfilter .....	1284
23.2.1.2	Filter mit Leitungen .....	1289
23.2.2	Dielektrische Filter .....	1290
23.2.3	SAW-Filter .....	1292
23.3	Schaltungen zur Impedanztransformation .....	1294
23.3.1	Anpassung .....	1295
23.3.1.1	Anpassnetzwerke mit zwei Elementen .....	1295
23.3.1.2	Collins-Filter .....	1299
23.3.1.3	Anpassung mit Streifenleitungen .....	1300
23.3.2	Ankopplung .....	1305
23.3.2.1	Ankopplung mit kapazitivem Spannungsteiler .....	1306
23.3.2.2	Ankopplung mit induktivem Spannungsteiler .....	1307
23.3.2.3	Ankopplung mit festgekoppeltem induktivem Spannungsteiler .....	1307
23.4	Leistungsteiler und Hybride .....	1307
23.4.1	Leistungsteiler .....	1309
23.4.1.1	Verlustbehaftete Leistungsteiler mit Widerständen ...	1309
23.4.1.2	Wilkinson-Teiler .....	1309
23.4.2	Hybride .....	1310
23.4.2.1	S-Parameter eines Hybrids .....	1310
23.4.2.2	Hybride mit Spulen und Kondensatoren .....	1312

23.4.2.3	Hybride mit Leitungen .....	1312
<b>24.</b>	<b>Hochfrequenz-Verstärker .....</b>	<b>1315</b>
24.1	Integrierte Hochfrequenz-Verstärker .....	1315
24.1.1	Anpassung .....	1317
24.1.1.1	Eingangsseitige Anpassung .....	1317
24.1.1.2	Ausgangsseitige Anpassung .....	1318
24.1.2	Rauschzahl .....	1319
24.1.3	Entwurf rauscharmer integrierter HF-Verstärker (LNA) .....	1321
24.1.3.1	Ohmsche Gegenkopplung bei niedrigen Frequenzen ..	1322
24.1.3.2	Gegenkopplung bei hohen Frequenzen .....	1328
24.2	HF-Verstärker mit Einzeltransistoren .....	1338
24.2.1	Verallgemeinerter Einzeltransistor .....	1339
24.2.2	Arbeitspunkteinstellung .....	1340
24.2.2.1	Gleichstromgegenkopplung .....	1340
24.2.2.2	Gleichspannungsgegenkopplung .....	1342
24.2.2.3	Arbeitspunktregelung .....	1342
24.2.3	Anpassung einstufiger Verstärker .....	1343
24.2.3.1	Bedingungen für die Anpassung .....	1343
24.2.3.2	Reflexionsfaktoren des Transistors .....	1344
24.2.3.3	Berechnung der Anpassung .....	1345
24.2.3.4	Stabilität bei der Betriebsfrequenz .....	1345
24.2.3.5	Berechnung der Anpassnetzwerke .....	1346
24.2.3.6	Stabilität im ganzen Frequenzbereich .....	1346
24.2.3.7	Leistungsverstärkung .....	1346
24.2.4	Anpassung mehrstufiger Verstärker .....	1351
24.2.4.1	Anpassung mit Serien-Induktivität .....	1352
24.2.5	Neutralisation .....	1352
24.2.5.1	Schaltungen zur Neutralisation .....	1352
24.2.5.2	Leistungsverstärkung bei Neutralisation .....	1352
24.2.6	Besondere Schaltungen zur Verbesserung der Anpassung .....	1355
24.2.6.1	Anpassung mit Zirkulatoren .....	1355
24.2.6.2	Anpassung mit Hybriden .....	1357
24.2.7	Rauschen .....	1358
24.2.7.1	Rauschparameter und Rauschzahl .....	1358
24.2.7.2	Entwurf eines rauscharmen Verstärkers .....	1358
24.3	Breitband-Verstärker .....	1361
24.3.1	Prinzip eines Breitband-Verstärkers .....	1361
24.3.2	Ausführung eines Breitband-Verstärkers .....	1363
24.4	Kenngrößen von Hochfrequenz-Verstärkern .....	1367
24.4.1	Leistungsverstärkung .....	1367
24.4.1.1	Klemmenleistungsgewinn .....	1368
24.4.1.2	Einfügungsgewinn .....	1369
24.4.1.3	Übertragungsgewinn .....	1369
24.4.1.4	Verfügbarer Leistungsgewinn .....	1370
24.4.1.5	Vergleich der Gewinn-Definitionen .....	1371
24.4.1.6	Gewinn bei beidseitiger Anpassung .....	1371
24.4.1.7	Maximaler Leistungsgewinn bei Transistoren .....	1372

24.4.2	Nichtlineare Kenngrößen	1374
24.4.2.1	Betriebsbedingungen	1375
24.4.2.2	Kennlinien eines Hochfrequenz-Verstärkers	1375
24.4.2.3	Kleinsignalverstärkung	1377
24.4.2.4	Kompressionspunkt	1378
24.4.2.5	Intermodulation	1379
<b>25.</b>	<b>Mischer</b>	<b>1381</b>
25.1	Funktionsprinzip eines idealen Mixers	1381
25.1.1	Aufwärtsmischer	1382
25.1.2	Abwärtsmischer	1382
25.1.3	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1385
25.2	Funktionsprinzipien bei praktischen Mixern	1387
25.2.1	Additive Mischung	1387
25.2.1.1	Gleichungsmäßige Beschreibung	1387
25.2.1.2	Nichtlinearität	1388
25.2.1.3	Praktische Ausführung	1391
25.2.1.4	Einsatz additiver Mixer	1396
25.2.2	Multiplikative Mischung	1396
25.2.2.1	Gleichungsmäßige Beschreibung	1396
25.2.2.2	Schaltverhalten der Schalter	1399
25.2.2.3	Nichtlinearität	1400
25.2.2.4	Praktische Ausführung	1400
25.3	Mischer mit Dioden	1400
25.3.1	Eintaktmischer	1401
25.3.1.1	LO-Kreis	1403
25.3.1.2	Kleinsignalersatzschaltbild	1405
25.3.1.3	Kleinsignalverhalten	1406
25.3.1.4	Mischverstärkung	1408
25.3.1.5	Mischgewinn	1409
25.3.1.6	Vergleich mit idealem Schalter	1411
25.3.1.7	Nachteile des Eintaktmischers	1412
25.3.2	Gegentaktmischer	1412
25.3.2.1	LO-Kreis	1414
25.3.2.2	Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1414
25.3.2.3	Vor- und Nachteile des Gegentaktmischers	1415
25.3.3	Ringmischer	1416
25.3.3.1	LO-Kreis	1417
25.3.3.2	Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1419
25.3.4	Breitbandiger Betrieb	1421
25.3.4.1	Kleinsignalverhalten	1422
25.3.4.2	Anpassung	1424
25.3.4.3	Mischgewinn	1425
25.3.4.4	Allgemeiner Fall	1427
25.3.4.5	Vergleich von Schmalband- und Breitbandbetrieb	1433
25.3.5	Kenngrößen	1433
25.3.6	Rauschen	1434
25.3.6.1	Verfahren zur Berechnung der Rauschzahl	1435

	25.3.6.2 Näherungen für Schmalband- und Breitbandbetrieb ..	1437
	25.3.7 Praktische Diodenmischer .....	1439
25.4	Passive Mischer mit Feldeffekttransistoren .....	1441
	25.4.1 Eintaktmischer .....	1442
	25.4.1.1 LO-Kreis .....	1442
	25.4.1.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten ..	1448
	25.4.1.3 Nachteile des Eintaktmischers .....	1451
	25.4.2 Gegentaktmischer .....	1452
	25.4.3 Ringmischer .....	1455
	25.4.4 Integrierte Fet-Mischer .....	1456
	25.4.5 Eigenschaften von passiven Fet-Mischern .....	1459
	25.4.5.1 Frequenzbereich .....	1459
	25.4.5.2 LO-Leistung .....	1459
	25.4.5.3 Nichtlinearität .....	1459
	25.4.5.4 Rauschen .....	1459
25.5	Aktive Mischer mit Transistoren .....	1460
	25.5.1 Gegentaktmischer .....	1460
	25.5.1.1 Berechnung des Übertragungsverhaltens .....	1461
	25.5.1.2 Rechteckförmige LO-Spannung .....	1462
	25.5.1.3 Sinusförmige LO-Spannung .....	1463
	25.5.1.4 Kleinsignalverhalten .....	1464
	25.5.1.5 Mischverstärkung .....	1465
	25.5.1.6 Bandbreite .....	1465
	25.5.1.7 Anpassung .....	1466
	25.5.1.8 Mischgewinn .....	1467
	25.5.1.9 Praktische Ausführung .....	1469
	25.5.1.10 Gegentaktmischer mit Übertragern .....	1471
	25.5.1.11 Nachteil des Gegentaktmischers mit Transistoren ....	1473
	25.5.2 Doppel-Gegentaktmischer (Gilbert-Mischer) .....	1473
	25.5.2.1 Berechnung des Übertragungsverhaltens .....	1475
	25.5.2.2 Kleinsignalverhalten .....	1477
	25.5.2.3 Mischverstärkung .....	1478
	25.5.2.4 Bandbreite .....	1479
	25.5.2.5 Doppel-Gegentaktmischer in integrierten Schaltungen	1479
	25.5.2.6 Anpassung .....	1480
	25.5.2.7 Mischgewinn .....	1482
	25.5.2.8 I/Q-Mischer mit Doppel-Gegentaktmischern .....	1484
	25.5.3 Kenngrößen .....	1485
	25.5.4 Rauschen .....	1485
25.6	Vergleich aktiver und passiver Mischer .....	1488
	25.6.1 Rauschzahl, Intercept-Punkt und Dynamikbereich .....	1488
	25.6.2 Bandbreite .....	1489
	25.6.3 LO-Leistung .....	1490
25.7	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung .....	1490
	25.7.1 Phasenschieber .....	1491
	25.7.1.1 RC-Phasenschieber .....	1491
	25.7.1.2 RC-Polyphasen-Filter .....	1491



25.7.1.3	Hybride als Phasenschieber .....	1493
25.7.2	Spiegelfrequenz-Unterdrückung .....	1494
<b>26.</b>	<b>Oszillatoren .....</b>	<b>1497</b>
26.1	LC-Oszillatoren .....	1498
26.1.1	LC-Resonanzkreise .....	1498
26.1.2	Verstärker mit selektiver Mitkopplung .....	1501
26.1.2.1	Mitkopplung mit Parallelschwingkreis .....	1502
26.1.2.2	Mitkopplung mit Serienschwingkreis .....	1503
26.1.2.3	Vergleich der Schaltungen .....	1503
26.1.3	Schleifenverstärkung .....	1503
26.1.3.1	Berechnung bei Verstärkern ohne Rückwirkung .....	1503
26.1.3.2	Berechnung bei Verstärkern mit Rückwirkung .....	1505
26.1.3.3	Güte der Schleifenverstärkung .....	1507
26.1.3.4	Übertragungsfunktion und Zeitsignale .....	1508
26.1.3.5	Schleifenverstärkung bei Übersteuerung .....	1510
26.1.3.6	Negative Widerstände .....	1511
26.1.4	LC-Oszillatoren mit zweistufigen Verstärkern .....	1512
26.1.4.1	Zweistufiger LC-Oszillator mit Parallelschwingkreis .....	1512
26.1.4.2	Zweistufiger Oszillator mit Serienschwingkreis .....	1516
26.1.4.3	Zusammenfassung der wichtigen Punkte .....	1518
26.1.5	LC-Oszillatoren mit einstufigen Verstärkern .....	1519
26.1.5.1	Colpitts-Oszillator in Basisschaltung .....	1520
26.1.5.2	Colpitts-Oszillator in Kollektorschaltung .....	1525
26.1.5.3	Colpitts-Oszillator in Emitterschaltung .....	1531
26.1.5.4	Colpitts-Oszillator mit CMOS-Inverter .....	1532
26.1.5.5	Colpitts-Oszillator mit Differenzverstärker .....	1533
26.1.5.6	Eigenschaften integrierter und diskreter Colpitts-Oszillatoren .....	1535
26.1.5.7	Hartley-Oszillatoren .....	1537
26.1.5.8	Gegentaktoszillatoren .....	1538
26.1.5.9	Weitere Oszillatoren .....	1544
26.2	Oszillatoren mit Leitungen .....	1546
26.2.1	Leitungsresonatoren .....	1547
26.2.1.1	Ersatzschaltbild .....	1547
26.2.1.2	Betriebsbedingungen .....	1547
26.2.1.3	Berechnung der Elemente .....	1547
26.2.1.4	Praktische Leitungsresonatoren .....	1549
26.2.1.5	Leitungsparameter .....	1553
26.2.2	Schaltungen .....	1555
26.2.2.1	Oszillatoren mit Leitungsresonatoren .....	1555
26.2.2.2	Oszillatoren mit dielektrischen Resonatoren .....	1559
26.3	Quarz-Oszillatoren .....	1559
26.3.1	Quarz-Resonatoren .....	1560
26.3.1.1	Ersatzschaltbild .....	1561
26.3.1.2	Impedanz und Resonanzfrequenzen .....	1561
26.3.1.3	Frequenzabgleich .....	1564
26.3.1.4	Verlustleistung .....	1566

26.3.1.5	Temperaturverhalten .....	1567
26.3.2	Schaltungen .....	1567
26.3.2.1	Taktoszillatoren .....	1568
26.3.2.2	Referenzoszillatoren .....	1571
26.3.3	Alternative Resonatoren .....	1577
26.3.3.1	Keramische Resonatoren .....	1577
26.3.3.2	Oberflächenwellen-Resonatoren .....	1577
26.4	Frequenzabstimmung .....	1579
26.4.1	Varaktoren .....	1580
26.4.1.1	Bipolare Varaktoren .....	1580
26.4.1.2	MOS-Varaktoren .....	1580
26.4.1.3	Kleinsignalmodell .....	1581
26.4.2	Abstimmung .....	1582
26.4.2.1	Abstimmung eines Parallelschwingkreises .....	1582
26.4.2.2	Kennlinie .....	1587
26.4.2.3	Abstimmung eines Serienschwingkreises .....	1589
26.4.2.4	Breitband-Abstimmung .....	1589
26.4.2.5	Aussteuerung .....	1592
26.4.2.6	Modulation .....	1593
26.5	Amplitudenregelung .....	1594
26.5.1	Regelung und Begrenzung .....	1594
26.5.2	Regelmechanismen .....	1595
26.5.2.1	Regelung über den Ruhestrom .....	1595
26.5.2.2	Regelung mit Stromteiler .....	1596
26.5.3	Amplitudenmessung .....	1597
26.6	Phasenrauschen .....	1599
26.6.1	Darstellung im Zeit- und im Frequenzbereich .....	1599
26.6.1.1	Zeitbereich .....	1599
26.6.1.2	Frequenzbereich .....	1601
26.6.2	Entstehung .....	1604
26.6.2.1	Linearer Anteil .....	1605
26.6.2.2	Modulations- und Konversionsanteil .....	1608
26.6.3	Frequenzteilung und Frequenzvervielfachung .....	1609
26.6.4	Betrieb mit einer Phasenregelschleife .....	1611
26.6.5	Vergleich verschiedener Oszillatoren .....	1613
<b>27. Phasenregelschleife (PLL)</b>	.....	<b>1615</b>
27.1	Anwendungen .....	1616
27.1.1	Frequenzsynthese (Synthesizer) .....	1616
27.1.2	Träger-/Takt-Regeneration (Synchronizer) .....	1616
27.1.3	Phasen-/Frequenz-Demodulation (Demodulator) .....	1618
27.2	Analoge PLL .....	1619
27.2.1	Komponenten .....	1619
27.2.2	Kennlinie des Mischers als Phasendetektor .....	1620
27.2.3	Phasendetektor-Konstante des Mischers .....	1622
27.2.4	Arbeitspunkt des Mischers .....	1623
27.2.5	Kennlinie des VCOs .....	1623
27.2.6	VCO-Konstante .....	1624

27.2.7	Arbeitspunkt der PLL	1624
27.2.8	Regelungstechnisches Kleinsignalersatzschaltbild	1625
27.2.9	Übertragungsfunktionen	1626
27.2.10	Schleifenbandbreite	1627
27.2.11	Wahl der Schleifenbandbreite	1628
27.2.12	Dimensionierung der Beispielschaltung	1628
27.2.13	Verhalten der PLL	1629
27.2.14	Phasenregelung	1632
27.2.15	Übertragungsfunktionen mit PI-Regler	1632
27.2.16	Dimensionierung mit PI-Regler	1634
27.2.17	Verhalten der analogen PLL mit PI-Regler	1639
27.2.18	Zusammenfassung	1641
27.3	Digitale PLL	1642
27.3.1	Digitale PLL mit EXOR-Phasendetektor	1643
27.3.2	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Stromausgang	1646
27.3.3	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Spannungsausgang	1647
27.3.4	Sequentielle Phasendetektoren	1649
27.3.4.1	Flankengetriggelter Phasendetektor	1649
27.3.4.2	Phasen-Frequenz-Detektor	1650
27.3.5	Störtöne	1656
27.3.6	Beispiel für eine digitale PLL mit Phasen-Frequenz-Detektor	1657
27.3.6.1	Kennlinien und Konstanten	1657
27.3.6.2	Dimensionierung des Schleifenfilters	1658
27.3.6.3	Verhalten	1661
27.3.7	Digitale PLL mit Frequenzteilern	1664
27.3.7.1	Blockschaltbild und Kleinsignalersatzschaltbild	1664
27.3.7.2	Kanalwahl und Teilerfaktorsteuerung	1664
27.3.7.3	Momentanwerte und Mittelwerte	1665
27.3.8	Integer-N-PLL	1665
27.3.9	Fractional-N-PLL	1666
27.3.9.1	Steuerbare Frequenzteiler	1666
27.3.9.2	Teilerfaktorsteuerung	1667
27.4	Rauschen	1685
27.4.1	Rauschsignale	1686
27.4.2	Übertragungsfunktionen	1686
27.4.3	Referenzoszillator und VCO	1688
27.4.4	Frequenzteiler	1691
27.4.5	Phasendetektor	1691
27.4.6	Schleifenfilter	1692
27.4.7	Minimierung des Phasenrauschens	1695
<b>28.</b>	<b>Anhang</b>	<b>1697</b>
28.1	PSpice-Kurzanleitung	1697
28.1.1	Grundsätzliches	1697
28.1.2	Programme und Dateien	1697
28.1.2.1	Spice	1697
28.1.2.2	PSpice	1697
28.1.3	Ein einfaches Beispiel	1700

---

28.1.3.1	Eingabe des Schaltplans .....	1700
28.1.3.2	Simulationsanweisungen eingeben .....	1705
28.1.3.3	Simulation starten .....	1708
28.1.3.4	Anzeigen der Ergebnisse .....	1708
28.1.3.5	Arbeitspunkt anzeigen .....	1713
28.1.3.6	Netzliste und Ausgabedatei .....	1714
28.1.4	Weitere Simulationsbeispiele .....	1716
28.1.4.1	Kennlinien eines Transistors .....	1716
28.1.4.2	Verwendung von Parametern .....	1716
28.1.5	Einbinden weiterer Bibliotheken .....	1720
28.1.6	Einige typische Fehler .....	1722
28.2	Passive RC- und LRC-Netzwerke .....	1724
28.2.1	Der Tiefpass .....	1724
28.2.1.1	Beschreibung im Frequenzbereich .....	1724
28.2.1.2	Beschreibung im Zeitbereich .....	1725
28.2.2	Der Hochpass .....	1728
28.2.2.1	Anwendung als Koppel-RC-Glied .....	1729
28.2.2.2	Anwendung als Differenzierglied .....	1730
28.2.2.3	Reihenschaltung mehrerer Hochpässe .....	1730
28.2.3	Kompensierter Spannungsteiler .....	1730
28.2.4	Passiver RC-Bandpass .....	1731
28.2.5	Wien–Robinson–Brücke .....	1732
28.2.6	Doppel-T-Filter .....	1733
28.2.7	Schwingkreis .....	1735
28.3	Erklärung der verwendeten Größen .....	1736
28.4	Typen der 7400-Logik-Familien .....	1744
28.5	Normwert-Reihen .....	1751
28.6	Farbcode .....	1752
28.7	Hersteller .....	1754
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>1763</b>
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>1767</b>