



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

---

2.3.1.1	Das Ebers-Moll-Modell	60
2.3.1.2	Das Transportmodell	63
2.3.1.3	Weitere Effekte	65
2.3.1.4	Stromverstärkung bei Normalbetrieb	68
2.3.1.5	Substrat-Dioden	69
2.3.1.6	Bahnwiderstände	69
2.3.2	Dynamisches Verhalten	71
2.3.2.1	Sperrschichtkapazitäten	71
2.3.2.2	Diffusionskapazitäten	73
2.3.2.3	Gummel-Poon-Modell	74
2.3.3	Kleinsignalmodell	78
2.3.3.1	Statisches Kleinsignalmodell	78
2.3.3.2	Dynamisches Kleinsignalmodell	80
2.3.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	81
2.3.3.4	Zusammenfassung der Kleinsignalparameter	85
2.3.4	Rauschen	85
2.3.4.1	Rauschdichten	85
2.3.4.2	Rauschquellen eines Bipolartransistors	88
2.3.4.3	Äquivalente Rauschquellen	88
2.3.4.4	Ersatzrauschquelle und Rauschzahl	91
2.3.4.5	Rauschzahl eines Bipolartransistors	92
2.3.4.6	Bestimmung des Basisbahnwiderstands	101
2.4	Grundschaltungen	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-Differenzverstärkers	349
4.1.4.7	Differenzverstärker mit aktiver Last	353
4.1.4.8	Offsetspannung eines Differenzverstärkers	355
4.1.4.9	Kleinsignalverhalten des Differenzverstärkers	357
4.1.4.10	Nichtlinearität	372
4.1.4.11	Arbeitspunkteinstellung	375
4.1.4.12	Frequenzgänge und Grenzfrequenzen des Differenzverstärkers	383
4.1.4.13	Zusammenfassung	398
4.1.5	Impedanzwandler	399
4.1.5.1	Einstufige Impedanzwandler	399
4.1.5.2	Mehrstufige Impedanzwandler	400

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

5.2.1	Das Prinzip . . . . .	519
5.2.2	Universalverstärker . . . . .	521
5.2.3	Betriebsspannungen . . . . .	523
5.2.4	Single-Supply-Verstärker . . . . .	525
	5.2.4.1 Phasenumkehr . . . . .	526
5.2.5	Rail-to-Rail-Verstärker . . . . .	527
5.2.6	Breitband-Operationsverstärker . . . . .	531
5.2.7	Frequenzgang-Korrektur . . . . .	536
	5.2.7.1 Grundlagen . . . . .	536
	5.2.7.2 Universelle Frequenzgang-Korrektur . . . . .	539
	5.2.7.3 Pole-Splitting . . . . .	540
	5.2.7.4 Angepasste Frequenzgangkorrektur . . . . .	541
	5.2.7.5 Slew-Rate . . . . .	542
	5.2.7.6 Kapazitive Last . . . . .	545
	5.2.7.7 Interne Lastkorrektur . . . . .	548
	5.2.7.8 Zweipolige Frequenzgangkorrektur . . . . .	549
5.2.8	Parameter von Operationsverstärkern . . . . .	550
	5.2.8.1 Differenz- und Gleichtaktverstärkung . . . . .	551
	5.2.8.2 Offsetspannung . . . . .	554
	5.2.8.3 Eingangsströme . . . . .	556
	5.2.8.4 Eingangswiderstände . . . . .	558
	5.2.8.5 Ausgangswiderstand . . . . .	559
	5.2.8.6 Beispiel für statische Fehler . . . . .	560
	5.2.8.7 Bandbreite . . . . .	562
	5.2.8.8 Rauschen . . . . .	564
5.3	Der Transkonduktanz-Verstärker (VC-OPV) . . . . .	568
	5.3.1 Innerer Aufbau . . . . .	568
	5.3.2 Typische Anwendung . . . . .	571
5.4	Der Transimpedanzverstärker (CV-OPV) . . . . .	572
	5.4.1 Innerer Aufbau . . . . .	572
	5.4.2 Frequenzverhalten . . . . .	575
	5.4.3 Typische Anwendungen . . . . .	579
5.5	Der Strom-Verstärker (CC-OPV) . . . . .	580
	5.5.1 Innerer Aufbau . . . . .	580
	5.5.2 Typische Anwendung . . . . .	582
	5.5.2.1 Anwendungen mit Stromgegenkopplung . . . . .	582
	5.5.2.2 Anwendungen mit Spannungsgegenkopplung . . . . .	586
5.6	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 .....	638
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 Grundschaltung	674
8.1.1.2	Taktzustandgesteuerte RS-Flip-Flops	675
8.1.1.3	Taktzustandgesteuerte D-Flip-Flops	675
8.1.2	Flip-Flops mit Zwischenspeicherung	676
8.1.2.1	JK Master-Slave Flip-Flops	677
8.1.2.2	D Master-Slave Flip-Flops	678
8.1.3	Zeitverhalten von Flip-Flops	679
8.1.3.1	Vergleich JK- und D-Flip-Flops	679
8.1.3.2	Metastabilität	680
8.1.4	Flip-Flops für Zähler	682
8.2	Dualzähler	684
8.2.1	Asynchroner Dualzähler	685
8.2.2	Synchrone Dualzähler	686

8.2.3	Vorwärts-Rückwärts-Zähler . . . . .	688
8.2.3.1	Zähler mit umschaltbarer Zählrichtung . . . . .	688
8.2.3.2	Zähler mit Vorwärts- und Rückwärts-Eingängen . . . . .	689
8.3	Synchrone BCD-Zähler . . . . .	689
8.4	Vorwahlzähler . . . . .	690
8.5	Schieberegister . . . . .	692
8.5.1	Grundschtaltung . . . . .	692
8.5.2	Schieberegister mit 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 . . . . .	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>Analogrechenschaltungen . . . . .</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	Grundsaltung .....	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 .....	1006
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 .....	1009
17.3 Analog-Digital Umsetzer .....	1010
17.3.1 Parallelverfahren .....	1010
17.3.2 Pipelineumsetzer .....	1013
17.3.3 Wägeverfahren .....	1015
17.3.4 Zählverfahren .....	1017
17.3.4.1 Modifiziertes Wägeverfahren .....	1017
17.3.4.2 Dual-Slope-Verfahren .....	1018
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	Synchronegleichrichter .....	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 . . . . .	1127
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.</b>	<b>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 Lokaloszillatorfrequenzen	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.</b>	<b>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>



<http://www.springer.com/978-3-642-31025-6>

Halbleiter-Schaltungstechnik

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

2012, XXXVII, 1807 S. Mit DVD., Hardcover

ISBN: 978-3-642-31025-6