

Inhaltsverzeichnis

Teil I. Grundlagen

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

1.4.1.3	Spannungsbegrenzung mit Z-Dioden	26
1.4.2	pin-Diode	27
1.4.3	Kapazitätsdiode	28
1.4.4	Brückengleichrichter	30
1.4.5	Mischer	31
2.	Bipolartransistor	35
2.1	Verhalten eines Bipolartransistors	35
2.1.1	Kennlinien	36
2.1.1.1	Ausgangskennlinienfeld	36
2.1.1.2	Übertragungskennlinienfeld	37
2.1.1.3	Eingangskennlinienfeld	37
2.1.1.4	Stromverstärkung	37
2.1.2	Beschreibung durch Gleichungen	37
2.1.2.1	Early-Effekt	38
2.1.2.2	Basisstrom und Stromverstärkung	38
2.1.2.3	Großsignalgleichungen	39
2.1.3	Verlauf der Stromverstärkung	39
2.1.3.1	Gummel-Plot	39
2.1.3.2	Darstellung des Verlaufs	40
2.1.3.3	Bestimmung der Werte	41
2.1.4	Arbeitspunkt und Kleinsignalverhalten	41
2.1.4.1	Bestimmung des Arbeitspunkts	42
2.1.4.2	Kleinsignalgleichungen und Kleinsignalparameter	43
2.1.4.3	Kleinsignalersatzschaltbild	45
2.1.4.4	Vierpol-Matrizen	46
2.1.4.5	Gültigkeitsbereich der Kleinsignalbetrachtung	46
2.1.5	Grenzdaten und Sperrströme	47
2.1.5.1	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	Grundsaltungen	101
2.4.1	Emitterschaltung	102
2.4.1.1	Übertragungskennlinie der Emitterschaltung	102
2.4.1.2	Kleinsignalverhalten der Emitterschaltung	104
2.4.1.3	Nichtlinearität	107
2.4.1.4	Temperaturabhängigkeit	107
2.4.1.5	Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung	108
2.4.1.6	Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung	114
2.4.1.7	Arbeitspunkteinstellung	121
2.4.1.8	Frequenzgang und obere Grenzfrequenz	129
2.4.1.9	Zusammenfassung	136
2.4.2	Kollektorschaltung	138
2.4.2.1	Übertragungskennlinie der Kollektorschaltung	138
2.4.2.2	Kleinsignalverhalten der Kollektorschaltung	140
2.4.2.3	Nichtlinearität	143
2.4.2.4	Temperaturabhängigkeit	144
2.4.2.5	Arbeitspunkteinstellung	144
2.4.2.6	Frequenzgang und obere Grenzfrequenz	147
2.4.2.7	Impedanztransformation mit der Kollektorschaltung	153
2.4.3	Basisschaltung	155
2.4.3.1	Übertragungskennlinie der Basisschaltung	155
2.4.3.2	Kleinsignalverhalten der Basisschaltung	157
2.4.3.3	Nichtlinearität	160
2.4.3.4	Temperaturabhängigkeit	160
2.4.3.5	Arbeitspunkteinstellung	161

2.4.3.6	Frequenzgang und obere Grenzfrequenz	163
2.4.4	Darlington-Schaltung	166
2.4.4.1	Kennlinien eines Darlington-Transistors	168
2.4.4.2	Beschreibung durch Gleichungen	169
2.4.4.3	Verlauf der Stromverstärkung	170
2.4.4.4	Kleinsignalverhalten	172
2.4.4.5	Schaltverhalten	174
3.	Feldeffekttransistor	177
3.1	Verhalten eines Feldeffekttransistors	178
3.1.1	Kennlinien	180
3.1.1.1	Ausgangskennlinienfeld	180
3.1.1.2	Abschnürbereich	180
3.1.1.3	Übertragungskennlinienfeld	182
3.1.1.4	Eingangskennlinien	182
3.1.2	Beschreibung durch Gleichungen	183
3.1.2.1	Verlauf der Kennlinien	184
3.1.2.2	Steilheitskoeffizient	185
3.1.2.3	Alternative Darstellung	186
3.1.2.4	Kanallängenmodulation	186
3.1.3	Feldeffekttransistor als steuerbarer Widerstand	187
3.1.4	Arbeitspunkt und Kleinsignalverhalten	189
3.1.4.1	Arbeitspunkt	189
3.1.4.2	Kleinsignalgleichungen und Kleinsignalparameter ...	190
3.1.4.3	Kleinsignalersatzschaltbild	192
3.1.4.4	Vierpol-Matrizen	192
3.1.4.5	Gültigkeitsbereich der Kleinsignalbetrachtung	192
3.1.5	Grenzdaten und Sperrströme	193
3.1.5.1	Durchbruchspannungen	193
3.1.5.2	Grenzströme	195
3.1.5.3	Sperrströme	195
3.1.5.4	Maximale Verlustleistung	196
3.1.5.5	Zulässiger Betriebsbereich	197
3.1.6	Thermisches Verhalten	197
3.1.7	Temperaturabhängigkeit der Fet-Parameter	197
3.1.7.1	Mosfet	197
3.1.7.2	Sperrschicht-Fet	199
3.2	Aufbau eines Feldeffekttransistors	199
3.2.1	Integrierte Mosfets	199
3.2.1.1	Aufbau	199
3.2.1.2	CMOS	200
3.2.1.3	Bulk-Dioden	200
3.2.1.4	Latch-up	201
3.2.1.5	Mosfets für höhere Spannungen	201
3.2.2	Einzel-Mosfets	202
3.2.2.1	Aufbau	202
3.2.2.2	Parasitäre Elemente	203
3.2.2.3	Kennlinien von vertikalen Leistungs-Mosfets	204

3.2.3	Sperrschicht-Fets	204
3.2.4	Gehäuse	205
3.3	Modelle für den Feldeffekttransistor	205
3.3.1	Statisches Verhalten	205
3.3.1.1	Level-1-Mosfet-Modell	206
3.3.1.2	Bahnwiderstände	211
3.3.1.3	Vertikale Leistungs-Mosfets	211
3.3.1.4	Sperrschicht-Fets	213
3.3.2	Dynamisches Verhalten	214
3.3.2.1	Kanalkapazitäten	214
3.3.2.2	Überlappungskapazitäten	216
3.3.2.3	Sperrschichtkapazitäten	217
3.3.2.4	Level-1-Mosfet-Modell	218
3.3.2.5	Einzel-Mosfets	219
3.3.2.6	Sperrschicht-Fet-Modell	221
3.3.3	Kleinsignalmodell	221
3.3.3.1	Statisches Kleinsignalmodell im Abschnürbereich	223
3.3.3.2	Dynamisches Kleinsignalmodell im Abschnürbereich	225
3.3.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	227
3.3.3.4	Zusammenfassung der Kleinsignalparameter	229
3.3.4	Rauschen	230
3.3.4.1	Rauschquellen eines Feldeffekttransistors	230
3.3.4.2	Äquivalente Rauschquellen	232
3.3.4.3	Ersatzrauschquelle und Rauschzahl	234
3.3.4.4	Rauschzahl eines Fets	235
3.3.4.5	Vergleich der Rauschzahlen von Fet und Bipolartransistor	238
3.4	Grundsaltungen	238
3.4.1	Sourceschaltung	239
3.4.1.1	Übertragungskennlinie der Sourceschaltung	240
3.4.1.2	Kleinsignalverhalten der Sourceschaltung	241
3.4.1.3	Nichtlinearität	242
3.4.1.4	Temperaturabhängigkeit	243
3.4.1.5	Sourceschaltung mit Stromgegenkopplung	243
3.4.1.6	Sourceschaltung mit Spannungsgegenkopplung	248
3.4.1.7	Arbeitspunkteinstellung	252
3.4.1.8	Frequenzgang und Grenzfrequenz	254
3.4.1.9	Zusammenfassung	260
3.4.2	Drainschaltung	262
3.4.2.1	Übertragungskennlinie der Drainschaltung	262
3.4.2.2	Kleinsignalverhalten der Drainschaltung	263
3.4.2.3	Nichtlinearität	265
3.4.2.4	Temperaturabhängigkeit	265
3.4.2.5	Arbeitspunkteinstellung	266
3.4.2.6	Frequenzgang und Grenzfrequenz	266
3.4.3	Gateschaltung	271
3.4.3.1	Übertragungskennlinie der Gateschaltung	271

3.4.3.2	Kleinsignalverhalten der Gateschaltung	273
3.4.3.3	Nichtlinearität	275
3.4.3.4	Temperaturabhängigkeit	275
3.4.3.5	Arbeitspunkteinstellung	275
3.4.3.6	Frequenzgang und Grenzfrequenz	276
4.	Verstärker	279
4.1	Schaltungen	281
4.1.1	Grundlagen	281
4.1.1.1	Kennlinien der Transistoren	281
4.1.1.2	Skalierung	282
4.1.1.3	Normierung	282
4.1.1.4	Komplementäre Transistoren	283
4.1.1.5	Auswirkung fertigungsbedingter Toleranzen	284
4.1.1.6	Dioden	285
4.1.2	Stromquellen und Stromspiegel	287
4.1.2.1	Prinzip einer Stromquelle	287
4.1.2.2	Einfache Stromquellen für diskrete Schaltungen	290
4.1.2.3	Einfacher Stromspiegel	292
4.1.2.4	Stromspiegel mit Kaskode	304
4.1.2.5	Kaskode-Stromspiegel	308
4.1.2.6	Wilson-Stromspiegel	314
4.1.2.7	Dynamisches Verhalten	316
4.1.2.8	Weitere Stromspiegel und Stromquellen	317
4.1.2.9	Stromspiegel für diskrete Schaltungen	324
4.1.3	Kaskodeschaltung	325
4.1.3.1	Kleinsignalverhalten der Kaskodeschaltung	326
4.1.3.2	Frequenzgang und Grenzfrequenz der Kaskodeschaltung	330
4.1.4	Differenzverstärker	339
4.1.4.1	Grundsaltung	339
4.1.4.2	Gleichtakt- und Differenzverstärkung	340
4.1.4.3	Eigenschaften des Differenzverstärkers	342
4.1.4.4	Unsymmetrischer Betrieb	342
4.1.4.5	Übertragungskennlinien des 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
5.		Operationsverstärker	509
	5.1	Übersicht	509
	5.1.1	Operationsverstärker-Typen	511
	5.1.2	Prinzip der Gegenkopplung	513
	5.1.2.1	Der nichtinvertierende Verstärker	514
	5.1.2.2	Der invertierende Verstärker	516
	5.2	Der normale Operationsverstärker (VV-OPV)	518

5.2.1	Das Prinzip	519
5.2.2	Universalverstärker	521
5.2.3	Betriebsspannungen	523
5.2.4	Single-Supply-Verstärker	525
5.2.4.1	Phasenumkehr	526
5.2.5	Rail-to-Rail-Verstärker	527
5.2.6	Breitband-Operationsverstärker	531
5.2.7	Frequenzgang-Korrektur	536
5.2.7.1	Grundlagen	536
5.2.7.2	Universelle Frequenzgang-Korrektur	539
5.2.7.3	Pole-Splitting	540
5.2.7.4	Angepasste Frequenzgangkorrektur	541
5.2.7.5	Slew-Rate	542
5.2.7.6	Kapazitive Last	545
5.2.7.7	Interne Lastkorrektur	548
5.2.7.8	Zweipolige Frequenzgangkorrektur	549
5.2.8	Parameter von Operationsverstärkern	550
5.2.8.1	Differenz- und Gleichtaktverstärkung	551
5.2.8.2	Offsetspannung	554
5.2.8.3	Eingangsströme	556
5.2.8.4	Eingangswiderstände	558
5.2.8.5	Ausgangswiderstand	559
5.2.8.6	Beispiel für statische Fehler	560
5.2.8.7	Bandbreite	562
5.2.8.8	Rauschen	564
5.3	Der Transkonduktanz-Verstärker (VC-OPV)	568
5.3.1	Innerer Aufbau	568
5.3.2	Typische Anwendung	571
5.4	Der Transimpedanzverstärker (CV-OPV)	572
5.4.1	Innerer Aufbau	572
5.4.2	Frequenzverhalten	575
5.4.3	Typische Anwendungen	579
5.5	Der Strom-Verstärker (CC-OPV)	580
5.5.1	Innerer Aufbau	580
5.5.2	Typische Anwendung	582
5.5.2.1	Anwendungen mit Stromgegenkopplung	582
5.5.2.2	Anwendungen mit Spannungsgegenkopplung	586
5.6	Spannungsfolger, Buffer	589
5.6.1	Open-Loop-Buffer	590
5.6.2	Closed-Loop-Buffer	591
5.7	Vergleich	593
5.7.1	Praktischer Einsatz	598
5.7.1.1	Abblocken der Betriebsspannungen	598
5.7.1.2	Schwingneigung	598
5.7.1.3	Dämpfung	599
5.7.1.4	Gegenkopplungswiderstände	599
5.7.1.5	Verlustleistung	600

5.7.1.6	Kühlung	600
5.7.1.7	Übersteuerung	600
5.7.1.8	Eingangsschutz	600
5.7.2	Typen	600
5.7.2.1	Universaltypen	602
5.7.2.2	Präzisionstypen	602
5.7.2.3	Rauscharme Typen	602
5.7.2.4	Rail-to-Rail-Output Verstärker	602
5.7.2.5	Rail-to-Rail-IO Verstärker	603
5.7.2.6	Hohe Bandbreite	603
5.7.2.7	Differentieller Ausgang	603
5.7.2.8	Hohe Ausgangsspannung	603
5.7.2.9	Hoher Ausgangsstrom	604
5.7.2.10	CV-Operationsverstärker	604
5.7.2.11	VC-Operationsverstärker	604
5.7.2.12	CC-Operationsverstärker	604
5.7.2.13	Klassifizierung	604
6.	Digitaltechnik Grundlagen	617
6.1	Die logischen Grundfunktionen	617
6.2	Aufstellung logischer Funktionen	619
6.2.1	Das Karnaugh-Diagramm	621
6.3	Abgeleitete Grundfunktionen	624
6.4	Schaltungstechnische Realisierung der Grundfunktionen	625
6.4.1	Statische und dynamische Daten	625
6.4.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL)	627
6.4.2.1	Open-Collector-Ausgänge	628
6.4.2.2	Tristate-Ausgänge	629
6.4.3	Komplementäre MOS-Logik (CMOS)	630
6.4.3.1	CMOS-Inverter	630
6.4.3.2	Offene Eingänge	631
6.4.3.3	Statische Ladungen	632
6.4.3.4	CMOS-Gatter	633
6.4.3.5	Transmission-Gate	633
6.4.4	Emittergekoppelte Logik (ECL)	635
6.4.4.1	PECL-Gatter	635
6.4.4.2	NECL-Gatter	636
6.4.4.3	Wired-OR-Verknüpfung	637
6.4.4.4	Schaltzeiten	637
6.4.4.5	Verlustleistung	638
6.4.5	Current Mode Logik (CML)	638
6.4.5.1	CML-Gatter	639
6.4.5.2	CML-Flip-Flop	641
6.4.6	Low Voltage Differential Signaling (LVDS)	641
6.4.7	Vergleich der Logikfamilien	643
6.5	Verbindungsleitungen	644
6.6	Hazards	646
6.7	Kopplung von Logikfamilien	647

6.8	Betriebsspannungen	648
7.	Schaltnetze (Kombinatorische Logik)	651
7.1	Multiplexer	652
7.1.1	1-aus-n-Decoder	653
7.1.2	Demultiplexer	653
7.1.3	Multiplexer	654
7.2	Schiebelogik (Barrel Shifter)	656
7.3	Prioritätsdecoder	657
7.4	Kombinatorischer Zähler	658
7.5	Paritätsgenerator	658
7.6	Komparatoren	659
7.7	Zahlendarstellung	661
7.7.1	Positive ganze Zahlen im Dualcode	661
7.7.1.1	Oktalcode	661
7.7.1.2	Hexadezimalcode	661
7.7.2	BCD-Code	662
7.7.3	Ganze Dualzahlen mit beliebigem Vorzeichen	662
7.7.3.1	Darstellung nach Betrag und Vorzeichen	662
7.7.3.2	Darstellung im Zweierkomplement (Two's Complement)	663
7.7.3.3	Vorzeichenergänzung (Sign Extension)	664
7.7.3.4	Offset-Dual-Darstellung (Offset Binary)	664
7.7.4	Festkomma-Dualzahlen	665
7.7.5	Gleitkomma-Dualzahlen	665
7.8	Addierer	668
7.8.1	Halbaddierer	668
7.8.2	Volladdierer	669
7.8.3	Parallele Übertragslogik	669
7.8.4	Subtraktion	671
7.8.5	Zweierkomplement-Überlauf	672
7.8.6	Addition und Subtraktion von Gleitkomma-Zahlen	673
7.9	Multiplizierer	673
7.9.1	Multiplikation von Festkomma-Zahlen	673
7.9.2	Multiplikation von Gleitkomma-Zahlen	675
8.	Schaltwerke (Sequentielle Logik)	677
8.1	Flip-Flops	677
8.1.1	Transparente Flip-Flops	678
8.1.1.1	Flip-Flop Grundschaltung	678
8.1.1.2	Taktzustandgesteuerte RS-Flip-Flops	679
8.1.1.3	Taktzustandgesteuerte D-Flip-Flops	679
8.1.2	Flip-Flops mit Zwischenspeicherung	680
8.1.2.1	JK Master-Slave Flip-Flops	681
8.1.2.2	D Master-Slave Flip-Flops	682
8.1.3	Zeitverhalten von Flip-Flops	683
8.1.3.1	Vergleich JK- und D-Flip-Flops	683
8.1.3.2	Metastabilität	684
8.1.4	Flip-Flops für Zähler	686

8.2	Dualzähler	688
8.2.1	Asynchroner Dualzähler	689
8.2.2	Synchrone Dualzähler	690
8.2.3	Vorwärts-Rückwärts-Zähler	692
8.2.3.1	Zähler mit umschaltbarer Zählrichtung	692
8.2.3.2	Zähler mit Vorwärts- und Rückwärts-Eingängen	693
8.3	Synchrone BCD-Zähler	693
8.4	Vorwahlzähler	694
8.5	Schieberegister	696
8.5.1	Grundschtaltung	696
8.5.2	Schieberegister mit Paralleleingabe	696
8.5.3	Erzeugung von Pseudozufallsfolgen	698
8.6	Aufbereitung asynchroner Signale	700
8.6.1	Entprellung mechanischer Kontakte	700
8.6.2	Flankengetriggertes RS-Flip-Flop	701
8.6.3	Synchronisation von asynchronen Daten	702
8.6.4	Synchroner Zeitschalter	702
8.6.5	Synchroner Änderungsdetektor	704
8.6.6	Synchroner Taktschalter	704
8.7	Systematischer Entwurf von Schaltwerken	704
8.7.1	Zustandsdiagramm	705
8.7.2	Entwurfsbeispiel für einen Dualzähler	706
8.7.3	Entwurfsbeispiel für einen umschaltbaren Zähler	707
9.	Halbleiterspeicher	711
9.1	Programmierbare Logik	711
9.1.1	Programmierbare Logische Bauelemente (PLDs)	711
9.1.1.1	Typenübersicht	714
9.1.2	Anwender-programmierbare Gate-Arrays	715
9.1.2.1	Typenübersicht	717
9.1.3	Computer-gestützter PLD-Entwurf	718
9.2	Datenspeicher	719
9.2.1	Statische RAMs	722
9.2.1.1	Zeitbedingungen	722
9.2.2	Dynamische RAMs	723
9.2.3	Flash Speicher	728
9.3	Fehler-Erkennung und -Korrektur	730
9.3.1	Paritätsbit	730
9.3.2	Hamming-Code	731
9.4	First-In-First-Out Memories (FIFO)	733
9.4.1	Prinzip	733
9.4.2	Standart FIFOs	734
9.4.3	FIFO-Realisierung mit Standard-RAMs	735
 Teil II. Anwendungen		
10.	Analogrechenschaltungen	739
10.1	Addierer	739
10.2	Subtrahierer	740

10.2.1	Rückführung auf die Addition	740
10.2.2	Subtrahierer mit einem Operationsverstärker	741
10.3	Bipolares Koeffizientenglied	743
10.4	Integratoren	744
10.4.1	Invertierender Integrator	744
10.4.2	Anfangsbedingung	747
10.4.3	Summationsintegrator	748
10.4.4	Nicht invertierender Integrator	748
10.4.5	Integrator für hohe Frequenzen	749
10.5	Differentiatoren	751
10.5.1	Prinzipschaltung	751
10.5.2	Praktische Realisierung	751
10.5.3	Differentiator mit hohem Eingangswiderstand	752
10.6	Lösung von Differentialgleichungen	753
10.7	Funktionsnetzwerke	755
10.7.1	Logarithmus	755
10.7.2	Exponentialfunktion	758
10.7.3	Bildung von Potenzfunktionen über Logarithmen	760
10.8	Analog-Multiplizierer	761
10.8.1	Multiplizierer mit logarithmierenden Funktionsgeneratoren	761
10.8.2	Steilheitsmultiplizierer	762
11.	Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter	767
11.1	Spannungsgesteuerte Spannungsquellen	767
11.1.1	Ideale Spannungsquelle	768
11.1.2	Spannungsquelle mit negativem Ausgangswiderstand	769
11.2	Stromgesteuerte Spannungsquellen	770
11.3	Spannungsgesteuerte Stromquellen	771
11.3.1	Stromquellen für potentialfreie Verbraucher	771
11.3.2	Stromquellen für geerdete Verbraucher	773
11.3.3	Transistor-Präzisionsstromquellen	774
11.3.3.1	Transistor-Stromquellen für bipolare Ausgangsströme	776
11.3.4	Schwimmende Stromquellen	779
11.4	Stromgesteuerte Stromquellen	780
11.5	Der NIC (Negative Impedance Converter)	781
11.6	Der Gyrator	783
11.6.1	Transformation von Zweipolen	784
11.6.2	Transformation von Vierpolen	785
11.7	Der Zirkulator	786
12.	Aktive Filter	789
12.1	Theoretische Grundlagen von Tiefpassfiltern	789
12.1.1	Passive Tiefpässe 1. Ordnung	789
12.1.1.1	Beschreibung im Frequenzbereich	789
12.1.1.2	Beschreibung im Zeitbereich	792
12.1.2	Vergleich von Tiefpassfiltern	794
12.1.3	Filter mit kritischer Dämpfung	799
12.1.4	Butterworth-Tiefpässe	800
12.1.5	Tschebyscheff-Tiefpässe	801

12.1.6	Bessel-Tiefpässe	804
12.1.7	Zusammenfassung der Theorie	805
12.2	Simulation von Filtern	813
12.3	Tiefpass-Hochpass-Transformation	815
12.4	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 1. Ordnung	815
12.5	Realisierung von Tief- und Hochpassfiltern 2. Ordnung	817
12.5.1	LRC-Filter	817
12.5.2	Filter mit Mehrfachgegenkopplung	817
12.5.3	Tiefpassfilter mit Einfachmitkopplung	819
12.5.4	Hochpassfilter mit Einfachmitkopplung	821
12.6	Realisierung von Tiefpassfiltern höherer Ordnung	822
12.7	Tiefpass-Bandpass-Transformation	826
12.7.1	Bandpassfilter 2. Ordnung	827
12.7.2	Bandpassfilter 4. Ordnung	829
12.8	Realisierung von Bandpassfiltern 2. Ordnung	832
12.8.1	RC-Filter	832
12.8.2	LRC-Filter	832
12.8.3	Bandpass mit Mehrfachgegenkopplung	833
12.8.4	Bandpass mit Einfachmitkopplung	834
12.9	Tiefpass-Bandsperren-Transformation	835
12.10	Realisierung von Bandsperren 2. Ordnung	837
12.10.1	LRC-Sperrfilter	837
12.10.2	Bandsperre aus Hoch- und Tiefpass	838
12.10.3	Bandsperre mit Bandpass	838
12.10.4	Bandsperre als inverser Bandpass	839
12.11	Allpässe	839
12.11.1	Grundlagen	839
12.11.2	Realisierung von Allpässen 1. Ordnung	843
12.11.3	Realisierung von Allpässen 2. Ordnung	844
12.12	Integratorfilter	845
12.12.1	Grundschialtung	846
12.12.2	Integratorfilter mit zusätzlichem Hochpass-Ausgang	847
12.12.3	Integratorfilter mit zusätzlichem Bandsperren-Ausgang	848
12.12.4	Elektronische Steuerung der Filterparameter	849
12.12.5	Filter mit einstellbaren Koeffizienten	851
12.12.6	Integratorfilter mit VC- und CC-Operationsverstärkern	853
12.13	Switched-Capacitor-Filter	856
12.13.1	Grundprinzip	856
12.13.2	Der SC-Integrator	856
12.13.3	SC-Filter 1. Ordnung	857
12.13.4	SC-Filter 2. Ordnung	858
12.13.5	Allgemeine Gesichtspunkte beim Einsatz von SC-Filtern	859
12.14	Vergleich der Übertragungsfunktionen	860
12.15	Realisierung von Filtern	861
13. Regler	863
13.1	Grundlagen	863
13.1.1	Komponenten eines Regelkreises	864

13.1.2	Beispielstrecke	865
13.2	Regler-Typen	866
13.2.1	P-Regler	867
13.2.2	PI-Regler	868
13.2.3	PID-Regler	870
13.2.4	Kompensator	873
13.2.5	Realisierung der Regler	875
13.3	Regelung nichtlinearer Strecken	878
13.3.1	Statische Nichtlinearität	878
13.3.2	Dynamische Nichtlinearität	880
14.	Signalgeneratoren	883
14.1	Rechteckformung	883
14.1.1	Komparator	883
14.1.1.1	Fensterkomparator	885
14.1.2	Schmitt-Trigger	885
14.2	Impulserzeugung	887
14.2.1	Erzeugung kurzer Impulse	887
14.2.2	Erzeugung längerer Impulse	888
14.3	Rechteckgeneratoren	890
14.3.1	Funktionsgeneratoren	890
14.3.2	Einfache Rechteckgeneratoren	893
14.3.2.1	Timer als Schmitt-Trigger	893
14.3.2.2	Operationsverstärker als Schmitt-Trigger	894
14.3.2.3	Gatter als Schmitt-Trigger	895
14.3.3	Rechteckgeneratoren mit hoher Frequenzgenauigkeit	896
14.4	Sinusschwingungen	896
14.4.1	Arbiträrgenerator	896
14.4.2	Direkte Digitale Synthese	897
15.	Leistungsverstärker	899
15.1	Emitterfolger als Leistungsverstärker	899
15.2	Komplementäre Emitterfolger	901
15.2.1	Komplementäre Emitterfolger in B-Betrieb	901
15.2.2	Komplementäre Emitterfolger in AB-Betrieb	903
15.3	Komplementäre Darlington-Schaltungen	905
15.4	Komplementäre Drainschaltungen	906
15.5	Komplementäre Sourceschaltungen	907
15.6	Strombegrenzung	909
15.6.0.1	Spannungsabhängige Strombegrenzung	910
15.7	Vier-Quadranten-Betrieb	911
15.8	Dimensionierung einer Leistungsendstufe	912
15.9	Ansteuerschaltungen mit Spannungsverstärkung	914
15.9.1	Breitband-Ansteuerschaltung	915
15.10	Erhöhung der Ausgangsleistung integrierter Operationsverstärker	917
15.11	Eine Betriebsspannung	918
15.11.1	Wechselspannungskopplung	919
15.11.2	Brückenschaltung	919
15.12	Getaktete Leistungsverstärker	921

16. Stromversorgung	927
16.1 Eigenschaften von Netztransformatoren	929
16.2 Netzgleichrichter	930
16.2.1 Einweggleichrichter	930
16.2.2 Brückengleichrichter	931
16.2.3 Mittelpunkt-Schaltung	935
16.2.3.1 Grundschtaltung	935
16.2.3.2 Doppelte Mittelpunktschaltung	936
16.3 Lineare Spannungsregler	936
16.3.1 Prinzipien	937
16.3.2 Praktische Ausführung	938
16.3.3 Einstellung der Ausgangsspannung	939
16.3.4 Spannungsregler mit geringem Spannungsverlust	940
16.3.5 Spannungsregler für negative Spannungen	941
16.3.6 Labornetzgeräte	942
16.3.7 Integrierte Spannungsregler	943
16.4 Erzeugung der Referenzspannung	944
16.4.1 Referenzspannungsquellen mit Z-Dioden	944
16.4.2 Bandabstands-Referenz	946
16.4.3 Typenübersicht	948
16.5 Schaltregler ohne Potentialtrennung	949
16.5.1 Der Abwärts-Wandler	951
16.5.1.1 Prinzip	951
16.5.1.2 Ausführungsbeispiel	953
16.5.1.3 Leistungsschalter	954
16.5.1.4 Pulsbreitenmodulation	956
16.5.1.5 Pulsfrequenzmodulation	960
16.5.2 Aufwärts-Wandler	961
16.5.3 Invertierender Wandler	962
16.5.4 Aufwärts- Abwärts-wandler	963
16.5.5 Sepic Konverter	964
16.5.6 Spannungswandler mit Ladungspumpe	966
16.5.7 Typenübersicht	968
16.6 Schaltregler mit Potentialtrennung	969
16.6.1 Eintakt-Wandler	969
16.6.1.1 Eintakt-Sperrwandler	969
16.6.1.2 Eintakt-Durchflusswandler	972
16.6.2 Gegentakt-Wandler	974
16.6.2.1 Gegentakt-Wandler mit Parallelspeisung	974
16.6.2.2 Gegentakt-Wandler in Halbbrückenschaltung	975
16.6.2.3 Gegentakt-Wandler in Brückenschaltung	977
16.6.3 Resonanzumrichter	980
16.6.4 Aktive Gleichrichtung	980
16.6.5 Leistungsschalter	983
16.6.5.1 Leistungstransistoren	983
16.6.5.2 Gatetreiber ohne Potentialtrennung	987
16.6.5.3 Gatetreiber mit Potentialtrennung	990

16.6.6	Integrierte Gatetreiber	993
16.6.7	Hochfrequenztransformatoren	994
16.6.8	Verlustanalyse	996
16.7	Leistungsfaktorkorrektur	997
16.8	Solarwechselrichter	1000
16.9	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	1004
16.10	Stromversorgung mit Akkus	1005
16.10.1	Akkutechnologien	1005
16.10.2	Entladung	1006
16.10.3	Ladung	1006
16.10.4	Ladegerät	1008
17.	DA- und AD-Umsetzer	1013
17.1	Systemtheoretische Grundlagen	1014
17.1.1	Quantisierung der Zeit	1014
17.1.1.1	Abtasttheorem	1014
17.1.1.2	Rückgewinnung des Analogsignals	1016
17.1.1.3	Praktische Gesichtspunkte	1016
17.1.2	Quantisierung der Amplitude	1019
17.1.3	Spannungseinheit	1020
17.2	Digital-Analog Umsetzung	1020
17.2.1	Grundprinzipien der DA-Umsetzung	1020
17.2.2	Wägeverfahren mit geschalteten Spannungen	1021
17.2.2.1	Einsatz von Wechselschaltern	1022
17.2.2.2	Leiternetzwerk	1023
17.2.2.3	Inversbetrieb eines Leiternetzwerks	1024
17.2.3	Wägeverfahren mit geschalteten Strömen	1025
17.2.4	DA-Umsetzer für spezielle Anwendungen	1026
17.2.4.1	Verarbeitung vorzeichenbehafteter Zahlen	1026
17.2.4.2	Multiplizierende DA-Umsetzer	1028
17.2.4.3	Dividierende DA-Umsetzer	1029
17.2.5	Genauigkeit von DA-Umsetzern	1029
17.2.5.1	Statische Kenngrößen	1029
17.2.5.2	Glitche	1029
17.2.5.3	Typen	1030
17.3	Analog-Digital Umsetzer	1032
17.3.1	Parallelverfahren	1032
17.3.2	Pipelineumsetzer	1035
17.3.3	Wägeverfahren	1038
17.3.4	Zählverfahren	1041
17.3.4.1	Modifiziertes Wägeverfahren	1041
17.3.4.2	Dual-Slope-Verfahren	1042
17.3.5	Überabtastung	1044
17.3.6	Delta-Sigma-Verfahren	1045
17.3.7	Genauigkeit von AD-Umsetzern	1050
17.3.7.1	Statische Fehler	1050
17.3.7.2	Dynamische Fehler	1051
17.3.7.3	Vergleich der Verfahren	1052

17.4	Abtast-Halte-Glieder	1053
17.4.1	Grundlagen	1053
17.4.2	Transmission-Gate als Schalter	1055
17.4.3	Dioden-Brücke als Schalter	1056
18.	Messschaltungen	1059
18.1	Spannungsmessung	1059
18.1.1	Impedanzwandler	1059
18.1.1.1	Vergrößerung der Spannungsaussteuerbarkeit	1059
18.1.2	Messung von Potentialdifferenzen	1060
18.1.2.1	Subtrahierer mit beschalteten Operationsverstärkern ..	1060
18.1.2.2	Subtrahierer für hohe Spannungen	1062
18.1.2.3	Subtrahierer mit gegengekoppelten Differenzverstärkern	1063
18.1.2.4	Subtrahierer in SC-Technik	1064
18.1.3	Trennverstärker (Isolation Amplifier)	1065
18.2	Strommessung	1068
18.2.1	Strommessung mit Shunts	1068
18.2.2	Potentialfreies Amperemeter mit niedrigem Spannungsabfall ..	1071
18.2.3	Strommessung auf hohem Potential	1072
18.2.4	Strommessung über das Magnetfeld	1072
18.3	Messgleichrichter (AC/DC-Converter)	1075
18.3.1	Messung des Betragsmittelwertes	1075
18.3.1.1	Vollweggleichrichter mit geerdetem Ausgang	1076
18.3.1.2	Gleichrichtung durch Umschalten des Vorzeichens ...	1077
18.3.1.3	Breitband-Vollweggleichrichter	1078
18.3.2	Messung des Effektivwertes	1079
18.3.2.1	Echte Effektivwertmessung (True RMS)	1080
18.3.2.2	Leistungsmesser	1082
18.3.3	Messung des Scheitelwertes	1083
18.3.3.1	Momentane Scheitelwertmessung	1085
18.3.4	Synchrone Gleichrichter	1086
19.	Sensorik	1091
19.1	Temperaturmessung	1091
19.1.1	Kaltleiter auf Silizium-Basis, PTC-Sensoren	1094
19.1.2	Metalle als Kaltleiter, PTC-Sensoren	1098
19.1.3	Heißeleiter, NTC-Sensoren	1099
19.1.4	Transistor als Temperatursensor	1100
19.1.5	Das Thermoelement	1103
19.1.6	Typenübersicht	1108
19.2	Druckmessung	1108
19.2.1	Aufbau von Drucksensoren	1109
19.2.2	Betrieb temperaturkompensierter Drucksensoren	1110
19.2.3	Temperaturkompensation von Drucksensoren	1113
19.2.4	Handelsübliche Drucksensoren	1114
19.3	Feuchtemessung	1115
19.3.1	Feuchtesensoren	1116
19.3.2	Betriebsschaltungen für kapazitive Feuchtesensoren	1116

19.4	Drehwinkelkodierer	1118
19.5	Übertragung von Sensorsignalen	1122
19.5.1	Galvanisch gekoppelte Signalübertragung	1122
19.5.2	Galvanisch getrennte Signalübertragung	1125
19.6	Kalibrierung von Sensorsignalen	1126
19.6.1	Kalibrierung des Analogsignals	1127
19.6.2	Computer-gestützte Kalibrierung	1130
20.	Optoelektronische Bauelemente	1135
20.1	Fotometrische Grundbegriffe	1135
20.2	Leuchtdioden	1138
20.3	Fotodiode	1140
20.3.1	Fotozellen als Empfänger	1141
20.3.2	Fotozellen zur Energiegewinnung	1142
20.4	Fototransistor	1143
20.5	Optokoppler	1143
20.6	Optische Anzeige	1144
20.6.1	Flüssigkristallanzeigen	1144
20.6.2	Binär-Anzeige	1145
20.6.3	Analog-Anzeige	1147
20.6.4	Numerische Anzeige	1148
20.6.5	Multiplex Anzeige	1150
20.6.6	Alpha-Numerische Anzeige	1151
20.6.6.1	16-Segment-Anzeigen	1151
20.6.6.2	35-Punktmatrix-Anzeigen	1152
Teil III. Schaltungen der Nachrichtentechnik		
21.	Grundlagen	1159
21.1	Nachrichtentechnische Systeme	1159
21.2	Übertragungskanäle	1162
21.2.1	Leitung	1162
21.2.1.1	Feldwellenwiderstand und Ausbreitungsgeschwindigkeit	1163
21.2.1.2	Leitungswellenwiderstand	1163
21.2.1.3	Leitungsgleichung	1164
21.2.1.4	Dämpfung	1167
21.2.1.5	Kenngößen einer Leitung	1168
21.2.1.6	Vierpoldarstellung einer Leitung	1169
21.2.1.7	Leitung mit Abschluss	1170
21.2.1.8	Streifenleitung	1172
21.2.2	Drahtlose Verbindung	1173
21.2.2.1	Antennen	1173
21.2.2.2	Leistungsübertragung über eine drahtlose Verbindung	1176
21.2.2.3	Frequenzbereiche	1177
21.2.3	Faseroptische Verbindung	1178
21.2.3.1	Lichtwellenleiter	1179
21.2.3.2	Wellenlängenbereiche	1182
21.2.4	Vergleich der Übertragungskanäle	1183

21.3	Reflexionsfaktor und S-Parameter	1184
21.3.1	Wellengrößen	1184
21.3.1.1	Darstellung mit Hilfe von Spannung und Strom	1185
21.3.2	Reflexionsfaktor	1186
21.3.2.1	Reflexionsfaktor-Ebene (<i>r</i> -Ebene)	1186
21.3.2.2	Einfluss einer Leitung auf den Reflexionsfaktor	1187
21.3.2.3	Stehwellenverhältnis	1189
21.3.3	Wellenquelle	1192
21.3.3.1	Unabhängige Welle einer Wellenquelle	1192
21.3.3.2	Verfügbare Leistung	1192
21.3.4	S-Parameter	1193
21.3.4.1	S-Matrix	1193
21.3.4.2	Messung der S-Parameter	1196
21.3.4.3	Zusammenhang mit den Y-Parametern	1196
21.3.4.4	S-Parameter eines Transistors	1196
21.3.4.5	Ortskurven	1198
21.4	Modulationsverfahren	1200
21.4.1	Amplitudenmodulation	1204
21.4.1.1	Darstellung im Zeitbereich	1205
21.4.1.2	Darstellung im Frequenzbereich	1207
21.4.1.3	Modulation	1208
21.4.1.4	Demodulation	1209
21.4.2	Frequenzmodulation	1212
21.4.2.1	Darstellung im Zeitbereich	1213
21.4.2.2	Darstellung im Frequenzbereich	1214
21.4.2.3	Modulation	1217
21.4.2.4	Demodulation	1217
21.4.3	Digitale Modulationsverfahren	1220
21.4.3.1	Einfache Tastverfahren	1220
21.4.3.2	I/Q-Darstellung digitaler Modulationsverfahren	1223
21.4.3.3	Impulsformung	1230
21.4.3.4	Ein einfacher QPSK-Modulator	1235
21.5	Mehrfachnutzung und Gruppierung von Kanälen	1238
21.5.1	Multiplex-Verfahren	1238
21.5.1.1	Frequenzmultiplex	1238
21.5.1.2	Zeitmultiplex	1239
21.5.1.3	Codemultiplex	1240
21.5.2	Duplex-Verfahren	1246
21.5.2.1	Frequenzduplex	1246
21.5.2.2	Zeitduplex	1246
22.	Sender und Empfänger	1249
22.1	Sender	1249
22.1.1	Sender mit analoger Modulation	1249
22.1.1.1	Sender mit direkter Modulation	1249
22.1.1.2	Sender mit einer Zwischenfrequenz	1249
22.1.1.3	Sender mit zwei Zwischenfrequenzen	1252
22.1.1.4	Sender mit variabler Sendefrequenz	1254

22.1.2	Sender mit digitaler Modulation	1254
22.1.3	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen	1255
22.2	Empfänger	1257
22.2.1	Geradeausempfänger	1257
22.2.2	Überlagerungsempfänger	1258
22.2.2.1	HF-Filter	1259
22.2.2.2	Vorverstärker	1260
22.2.2.3	Vorselektion	1261
22.2.2.4	ZF-Filter	1261
22.2.2.5	Überlagerungsempfänger mit zwei Zwischenfrequenzen	1262
22.2.2.6	Erzeugung der Lokaloszillatorfrequenzen	1263
22.2.3	Verstärkungsregelung	1264
22.2.3.1	Regelverhalten	1265
22.2.3.2	Regelbarer Verstärker (VGA)	1267
22.2.3.3	Anordnung der Verstärkungsregelung im Empfänger ..	1269
22.2.3.4	Pegeldetektion	1269
22.2.3.5	Digitale Verstärkungsregelung	1270
22.2.4	Dynamikbereich eines Empfängers	1271
22.2.4.1	Rauschzahl des Empfängers	1273
22.2.4.2	Minimaler Empfangspegel	1274
22.2.4.3	Maximaler Empfangspegel	1275
22.2.4.4	Dynamikbereich	1276
22.2.5	Empfänger für digitale Modulationsverfahren	1281
22.2.5.1	Empfänger mit digitalen Kanalfiltern	1283
22.2.5.2	Empfänger mit ZF-Abtastung und digitalen Kanalfiltern	1288
22.2.5.3	Vergleich der Empfänger für digitale Modulationsverfahren	1292
22.2.5.4	Direktumsetzender Empfänger	1293
23. Passive Komponenten	1299	
23.1	Hochfrequenz-Ersatzschaltbilder	1299
23.1.1	Widerstand	1300
23.1.2	Spule	1301
23.1.3	Kondensator	1304
23.2	Filter	1305
23.2.1	LC-Filter	1306
23.2.1.1	Zweikreisiges Bandfilter	1306
23.2.1.2	Filter mit Leitungen	1311
23.2.2	Dielektrische Filter	1312
23.2.3	SAW-Filter	1314
23.3	Schaltungen zur Impedanztransformation	1316
23.3.1	Anpassung	1317
23.3.1.1	Anpassnetzwerke mit zwei Elementen	1317
23.3.1.2	Collins-Filter	1321
23.3.1.3	Anpassung mit Streifenleitungen	1322
23.3.2	Ankopplung	1327

	23.3.2.1 Ankopplung mit kapazitivem Spannungsteiler	1328
	23.3.2.2 Ankopplung mit induktivem Spannungsteiler	1329
	23.3.2.3 Ankopplung mit festgekoppeltem induktivem Spannungsteiler	1329
23.4	Leistungsteiler und Hybride	1329
23.4.1	Leistungsteiler	1331
	23.4.1.1 Verlustbehaftete Leistungsteiler mit Widerständen . . .	1331
	23.4.1.2 Wilkinson-Teiler	1331
23.4.2	Hybride	1332
	23.4.2.1 S-Parameter eines Hybrids	1332
	23.4.2.2 Hybride mit Spulen und Kondensatoren	1334
	23.4.2.3 Hybride mit Leitungen	1334
24.	Hochfrequenz-Verstärker	1337
24.1	Integrierte Hochfrequenz-Verstärker	1337
24.1.1	Anpassung	1339
	24.1.1.1 Eingangsseitige Anpassung	1339
	24.1.1.2 Ausgangsseitige Anpassung	1340
24.1.2	Rauschzahl	1341
24.1.3	Entwurf rauscharmer integrierter HF-Verstärker (LNA)	1343
	24.1.3.1 Ohmsche Gegenkopplung bei niedrigen Frequenzen . .	1344
	24.1.3.2 Gegenkopplung bei hohen Frequenzen	1350
24.2	HF-Verstärker mit Einzeltransistoren	1360
24.2.1	Verallgemeinerter Einzeltransistor	1361
24.2.2	Arbeitspunkteinstellung	1362
	24.2.2.1 Gleichstromgegenkopplung	1362
	24.2.2.2 Gleichspannungsgegenkopplung	1364
	24.2.2.3 Arbeitspunktregelung	1364
24.2.3	Anpassung einstufiger Verstärker	1365
	24.2.3.1 Bedingungen für die Anpassung	1365
	24.2.3.2 Reflexionsfaktoren des Transistors	1366
	24.2.3.3 Berechnung der Anpassung	1367
	24.2.3.4 Stabilität bei der Betriebsfrequenz	1367
	24.2.3.5 Berechnung der Anpassnetzwerke	1368
	24.2.3.6 Stabilität im ganzen Frequenzbereich	1368
	24.2.3.7 Leistungsverstärkung	1368
24.2.4	Anpassung mehrstufiger Verstärker	1373
	24.2.4.1 Anpassung mit Serien-Induktivität	1374
24.2.5	Neutralisation	1374
	24.2.5.1 Schaltungen zur Neutralisation	1374
	24.2.5.2 Leistungsverstärkung bei Neutralisation	1374
24.2.6	Besondere Schaltungen zur Verbesserung der Anpassung	1377
	24.2.6.1 Anpassung mit Zirkulatoren	1377
	24.2.6.2 Anpassung mit Hybriden	1379
24.2.7	Rauschen	1380
	24.2.7.1 Rauschparameter und Rauschzahl	1380
	24.2.7.2 Entwurf eines rauscharmen Verstärkers	1380
24.3	Breitband-Verstärker	1383

24.3.1	Prinzip eines Breitband-Verstärkers	1383
24.3.2	Ausführung eines Breitband-Verstärkers	1385
24.4	Kenngrößen von Hochfrequenz-Verstärkern	1389
24.4.1	Leistungsverstärkung	1389
24.4.1.1	Klemmenleistungsgewinn	1390
24.4.1.2	Einfügungsgewinn	1391
24.4.1.3	Übertragungsgewinn	1391
24.4.1.4	Verfügbare Leistungsgewinn	1392
24.4.1.5	Vergleich der Gewinn-Definitionen	1393
24.4.1.6	Gewinn bei beidseitiger Anpassung	1393
24.4.1.7	Maximaler Leistungsgewinn bei Transistoren	1394
24.4.2	Nichtlineare Kenngrößen	1396
24.4.2.1	Betriebsbedingungen	1397
24.4.2.2	Kennlinien eines Hochfrequenz-Verstärkers	1397
24.4.2.3	Kleinsignalverstärkung	1399
24.4.2.4	Kompressionspunkt	1400
24.4.2.5	Intermodulation	1401
25. Mischer		1403
25.1	Funktionsprinzip eines idealen Mixers	1403
25.1.1	Aufwärtsmischer	1404
25.1.2	Abwärtsmischer	1404
25.1.3	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1407
25.2	Funktionsprinzipien bei praktischen Mixern	1409
25.2.1	Additive Mischung	1409
25.2.1.1	Gleichungsmäßige Beschreibung	1409
25.2.1.2	Nichtlinearität	1410
25.2.1.3	Praktische Ausführung	1413
25.2.1.4	Einsatz additiver Mixer	1418
25.2.2	Multiplikative Mischung	1418
25.2.2.1	Gleichungsmäßige Beschreibung	1418
25.2.2.2	Schaltverhalten der Schalter	1421
25.2.2.3	Nichtlinearität	1422
25.2.2.4	Praktische Ausführung	1422
25.3	Mischer mit Dioden	1422
25.3.1	Eintaktmischer	1423
25.3.1.1	LO-Kreis	1425
25.3.1.2	Kleinsignalersatzschaltbild	1427
25.3.1.3	Kleinsignalverhalten	1428
25.3.1.4	Mischverstärkung	1430
25.3.1.5	Mischgewinn	1431
25.3.1.6	Vergleich mit idealem Schalter	1433
25.3.1.7	Nachteile des Eintaktmischers	1434
25.3.2	Gegentaktmischer	1434
25.3.2.1	LO-Kreis	1436
25.3.2.2	Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1436
25.3.2.3	Vor- und Nachteile des Gegentaktmischers	1437
25.3.3	Ringmischer	1438

	25.3.3.1 LO-Kreis	1439
	25.3.3.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1441
25.3.4	Breitbandiger Betrieb	1443
	25.3.4.1 Kleinsignalverhalten	1444
	25.3.4.2 Anpassung	1446
	25.3.4.3 Mischgewinn	1447
	25.3.4.4 Allgemeiner Fall	1449
	25.3.4.5 Vergleich von Schmalband- und Breitbandbetrieb	1455
25.3.5	Kenngrößen	1455
25.3.6	Rauschen	1456
	25.3.6.1 Verfahren zur Berechnung der Rauschzahl	1457
	25.3.6.2 Näherungen für Schmalband- und Breitbandbetrieb	1459
25.3.7	Praktische Diodenmischer	1461
25.4	Passive Mischer mit Feldeffekttransistoren	1463
25.4.1	Eintaktmischer	1464
	25.4.1.1 LO-Kreis	1464
	25.4.1.2 Kleinsignalersatzschaltbild und Kleinsignalverhalten	1470
	25.4.1.3 Nachteile des Eintaktmischers	1473
25.4.2	Gegentaktmischer	1474
25.4.3	Ringmischer	1477
25.4.4	Integrierte Fet-Mischer	1478
25.4.5	Eigenschaften von passiven Fet-Mischern	1481
	25.4.5.1 Frequenzbereich	1481
	25.4.5.2 LO-Leistung	1481
	25.4.5.3 Nichtlinearität	1481
	25.4.5.4 Rauschen	1481
25.5	Aktive Mischer mit Transistoren	1482
25.5.1	Gegentaktmischer	1482
	25.5.1.1 Berechnung des Übertragungsverhaltens	1483
	25.5.1.2 Rechteckförmige LO-Spannung	1484
	25.5.1.3 Sinusförmige LO-Spannung	1485
	25.5.1.4 Kleinsignalverhalten	1486
	25.5.1.5 Mischverstärkung	1487
	25.5.1.6 Bandbreite	1487
	25.5.1.7 Anpassung	1488
	25.5.1.8 Mischgewinn	1489
	25.5.1.9 Praktische Ausführung	1491
	25.5.1.10 Gegentaktmischer mit Übertragern	1493
	25.5.1.11 Nachteil des Gegentaktmischers mit Transistoren	1495
25.5.2	Doppel-Gegentaktmischer (Gilbert-Mischer)	1495
	25.5.2.1 Berechnung des Übertragungsverhaltens	1497
	25.5.2.2 Kleinsignalverhalten	1499
	25.5.2.3 Mischverstärkung	1500
	25.5.2.4 Bandbreite	1501
	25.5.2.5 Doppel-Gegentaktmischer in integrierten Schaltungen	1501
	25.5.2.6 Anpassung	1502
	25.5.2.7 Mischgewinn	1504

25.5.2.8	I/Q-Mischer mit Doppel-Gegentaktmischern	1506
25.5.3	Kenngrößen	1507
25.5.4	Rauschen	1507
25.6	Vergleich aktiver und passiver Mischer	1510
25.6.1	Rauschzahl, Intercept-Punkt und Dynamikbereich	1510
25.6.2	Bandbreite	1511
25.6.3	LO-Leistung	1512
25.7	Mischer mit Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1512
25.7.1	Phasenschieber	1513
25.7.1.1	RC-Phasenschieber	1513
25.7.1.2	RC-Polyphasen-Filter	1513
25.7.1.3	Hybride als Phasenschieber	1515
25.7.2	Spiegelfrequenz-Unterdrückung	1516
26. Oszillatoren		1519
26.1	LC-Oszillatoren	1520
26.1.1	LC-Resonanzkreise	1520
26.1.2	Verstärker mit selektiver Mitkopplung	1523
26.1.2.1	Mitkopplung mit Parallelschwingkreis	1524
26.1.2.2	Mitkopplung mit Serienschwingkreis	1525
26.1.2.3	Vergleich der Schaltungen	1525
26.1.3	Schleifenverstärkung	1525
26.1.3.1	Berechnung bei Verstärkern ohne Rückwirkung	1525
26.1.3.2	Berechnung bei Verstärkern mit Rückwirkung	1527
26.1.3.3	Güte der Schleifenverstärkung	1529
26.1.3.4	Übertragungsfunktion und Zeitsignale	1530
26.1.3.5	Schleifenverstärkung bei Übersteuerung	1532
26.1.3.6	Negative Widerstände	1533
26.1.4	LC-Oszillatoren mit zweistufigen Verstärkern	1534
26.1.4.1	Zweistufiger LC-Oszillator mit Parallelschwingkreis	1534
26.1.4.2	Zweistufiger Oszillator mit Serienschwingkreis	1538
26.1.4.3	Zusammenfassung der wichtigen Punkte	1540
26.1.5	LC-Oszillatoren mit einstufigen Verstärkern	1541
26.1.5.1	Colpitts-Oszillator in Basisschaltung	1542
26.1.5.2	Colpitts-Oszillator in Kollektorschaltung	1547
26.1.5.3	Colpitts-Oszillator in Emitterschaltung	1553
26.1.5.4	Colpitts-Oszillator mit CMOS-Inverter	1554
26.1.5.5	Colpitts-Oszillator mit Differenzverstärker	1555
26.1.5.6	Eigenschaften integrierter und diskreter Colpitts-Oszillatoren	1557
26.1.5.7	Hartley-Oszillatoren	1559
26.1.5.8	Gegentaktoszillatoren	1560
26.1.5.9	Weitere Oszillatoren	1566
26.2	Oszillatoren mit Leitungen	1568
26.2.1	Leitungsresonatoren	1569
26.2.1.1	Ersatzschaltbild	1569
26.2.1.2	Betriebsbedingungen	1569
26.2.1.3	Berechnung der Elemente	1569

	26.2.1.4 Praktische Leitungsresonatoren	1571
	26.2.1.5 Leitungsparameter	1575
26.2.2	Schaltungen	1577
	26.2.2.1 Oszillatoren mit Leitungsresonatoren	1577
	26.2.2.2 Oszillatoren mit dielektrischen Resonatoren	1581
26.3	Quarz-Oszillatoren	1581
26.3.1	Quarz-Resonatoren	1582
	26.3.1.1 Ersatzschaltbild	1583
	26.3.1.2 Impedanz und Resonanzfrequenzen	1583
	26.3.1.3 Frequenzabgleich	1586
	26.3.1.4 Verlustleistung	1588
	26.3.1.5 Temperaturverhalten	1589
26.3.2	Schaltungen	1589
	26.3.2.1 Taktoszillatoren	1590
	26.3.2.2 Referenzoszillatoren	1593
26.3.3	Alternative Resonatoren	1599
	26.3.3.1 Keramische Resonatoren	1599
	26.3.3.2 Oberflächenwellen-Resonatoren	1599
26.4	Frequenzabstimmung	1601
26.4.1	Varaktoren	1602
	26.4.1.1 Bipolare Varaktoren	1602
	26.4.1.2 MOS-Varaktoren	1602
	26.4.1.3 Kleinsignalmodell	1603
26.4.2	Abstimmung	1604
	26.4.2.1 Abstimmung eines Parallelschwingkreises	1604
	26.4.2.2 Kennlinie	1609
	26.4.2.3 Abstimmung eines Serienschwingkreises	1611
	26.4.2.4 Breitband-Abstimmung	1611
	26.4.2.5 Aussteuerung	1614
	26.4.2.6 Modulation	1615
26.5	Amplitudenregelung	1616
26.5.1	Regelung und Begrenzung	1616
26.5.2	Regelmechanismen	1617
	26.5.2.1 Regelung über den Ruhestrom	1617
	26.5.2.2 Regelung mit Stromteiler	1618
26.5.3	Amplitudenmessung	1619
26.6	Phasenrauschen	1621
26.6.1	Darstellung im Zeit- und im Frequenzbereich	1621
	26.6.1.1 Zeitbereich	1621
	26.6.1.2 Frequenzbereich	1623
26.6.2	Entstehung	1626
	26.6.2.1 Linearer Anteil	1627
	26.6.2.2 Modulations- und Konversionsanteil	1630
26.6.3	Frequenzteilung und Frequenzvervielfachung	1631
26.6.4	Betrieb mit einer Phasenregelschleife	1633
26.6.5	Vergleich verschiedener Oszillatoren	1635
27.	Phasenregelschleife (PLL)	1637

27.1	Anwendungen	1638
27.1.1	Frequenzsynthese (Synthesizer)	1638
27.1.2	Träger-/Takt-Regeneration (Synchronizer)	1638
27.1.3	Phasen-/Frequenz-Demodulation (Demodulator)	1640
27.2	Analoge PLL	1641
27.2.1	Komponenten	1641
27.2.2	Kennlinie des Mischers als Phasendetektor	1642
27.2.3	Phasendetektor-Konstante des Mischers	1644
27.2.4	Arbeitspunkt des Mischers	1645
27.2.5	Kennlinie des VCOs	1645
27.2.6	VCO-Konstante	1646
27.2.7	Arbeitspunkt der PLL	1646
27.2.8	Regelungstechnisches Kleinsignalersatzschaltbild	1647
27.2.9	Übertragungsfunktionen	1648
27.2.10	Schleifenbandbreite	1649
27.2.11	Wahl der Schleifenbandbreite	1650
27.2.12	Dimensionierung der Beispielschaltung	1650
27.2.13	Verhalten der PLL	1651
27.2.14	Phasenregelung	1654
27.2.15	Übertragungsfunktionen mit PI-Regler	1654
27.2.16	Dimensionierung mit PI-Regler	1656
27.2.17	Verhalten der analogen PLL mit PI-Regler	1661
27.2.18	Zusammenfassung	1663
27.3	Digitale PLL	1664
27.3.1	Digitale PLL mit EXOR-Phasendetektor	1665
27.3.2	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Stromausgang	1668
27.3.3	EXOR-/EXNOR-Phasendetektor mit Spannungsausgang	1669
27.3.4	Sequentielle Phasendetektoren	1671
27.3.4.1	Flankengetriggelter Phasendetektor	1671
27.3.4.2	Phasen-Frequenz-Detektor	1672
27.3.5	Störtöne	1678
27.3.6	Beispiel für eine digitale PLL mit Phasen-Frequenz-Detektor ..	1679
27.3.6.1	Kennlinien und Konstanten	1679
27.3.6.2	Dimensionierung des Schleifenfilters	1680
27.3.6.3	Verhalten	1683
27.3.7	Digitale PLL mit Frequenzteilern	1686
27.3.7.1	Blockschaltbild und Kleinsignalersatzschaltbild	1686
27.3.7.2	Kanalwahl und Teilerfaktorsteuerung	1686
27.3.7.3	Momentanwerte und Mittelwerte	1687
27.3.8	Integer-N-PLL	1687
27.3.9	Fractional-N-PLL	1688
27.3.9.1	Steuerbare Frequenzteiler	1688
27.3.9.2	Teilerfaktorsteuerung	1689
27.4	Rauschen	1707
27.4.1	Rauschsignale	1708
27.4.2	Übertragungsfunktionen	1708
27.4.3	Referenzoszillator und VCO	1710

27.4.4	Frequenzteiler	1713
27.4.5	Phasendetektor	1713
27.4.6	Schleifenfilter	1714
27.4.7	Minimierung des Phasenrauschens	1717
28.	Anhang	1719
28.1	PSpice-Kurzanleitung	1719
28.1.1	Grundsätzliches	1719
28.1.2	Programme und Dateien	1719
28.1.2.1	Spice	1719
28.1.2.2	PSpice	1719
28.1.3	Ein einfaches Beispiel	1722
28.1.3.1	Eingabe des Schaltplans	1722
28.1.3.2	Simulationsanweisungen eingeben	1727
28.1.3.3	Simulation starten	1730
28.1.3.4	Anzeigen der Ergebnisse	1730
28.1.3.5	Arbeitspunkt anzeigen	1735
28.1.3.6	Netzliste und Ausgabedatei	1736
28.1.4	Weitere Simulationsbeispiele	1738
28.1.4.1	Kennlinien eines Transistors	1738
28.1.4.2	Verwendung von Parametern	1738
28.1.5	Einbinden weiterer Bibliotheken	1742
28.1.6	Einige typische Fehler	1744
28.2	Erklärung der verwendeten Größen	1746
28.3	Typen der 7400-Logik-Familien	1754
28.4	Normwert-Reihen	1761
28.5	Farbcode	1762
28.6	Hersteller	1764
	Literaturverzeichnis	1771
	Sachverzeichnis	1775



<http://www.springer.com/978-3-662-48354-1>

Halbleiter-Schaltungstechnik

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

2016, XXXVII, 1815 S., Hardcover

ISBN: 978-3-662-48354-1