

Hochfrequenztechnik

Elektronik und Signalverarbeitung

Bearbeitet von

Anton Vlcek, O. Zinke, H. Brunswig, Hans Ludwig Hartnagel, Konrad Mayer

überarbeitet 1998. Buch. xx, 678 S. Hardcover

ISBN 978 3 540 64728 7

Format (B x L): 17 x 24,2 cm

Gewicht: 1359 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Elektronik > Mikrowellentechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

Inhaltsverzeichnis

7. Halbleiter, Halbleiterbauelemente und Elektronenröhren	
(H. L. Hartnagel; A. Vlcek; O. Zinke)	1
7.1 Physikalische Eigenschaften von Halbleitern (H. L. Hartnagel; A. Vlcek; O. Zinke)	2
7.1.1 Leitfähigkeit von Halbleitern	3
7.1.2 Eigenleitung von Halbleitern (Ge, Si, GaAs)	4
7.1.3 Störstellenleitung (Dotierung)	7
7.1.4 Die Schrödingergleichung (A. Vlcek)	8
7.1.5 Bändermodell von Halbleitern	21
7.1.6 Trägerdichte als Funktion der Zustandsdichte und der Fermi-Verteilung	24
7.1.7 Der Elektronentransfereffekt (H. L. Hartnagel)	25
7.2 Halbleiterbauelemente mit zwei Elektroden (Dioden und Gunn-Elemente) (R. Losehand; O. Zinke)	27
7.2.1 Der p-n-Übergang	27
7.2.1.1 Überblick: Der p-n-Übergang ohne äußere Spannung (O. Zinke)	27
7.2.1.2 Bändermodell, Ladungen, Feldstärke und Potential im p-n-Übergang	30
7.2.1.3 Statische Kennlinie des p-n-Übergangs	34
7.2.1.4 Durchbruchsmechanismen	40
7.2.2 Der Metall-Halbleiter-Übergang	43
7.2.2.1 Ladungen und Potential im Metall-Halbleiter-Übergang	43
7.2.2.2 Statische Kennlinie des Metall-Halbleiter-Übergangs	46
7.2.2.3 Der Metall-Halbleiter-Übergang als Ohmscher Kontakt	49
7.2.2.4 Übergänge in Heterostrukturen	51
7.2.3 Hochfrequenzdioden	52
7.2.3.1 PIN-Dioden und Speichervaraktoren	53
7.2.3.2 Kapazitätsdioden und Sperrsichtvaraktoren	59
7.2.3.3 Schottkydioden	61
7.2.3.4 Hochfrequenz-Photodioden	64
7.2.4 Dioden für Hochfrequenzoszillatoren	66
7.2.4.1 Tunneldioden	67
7.2.4.2 Lawinenlaufzeitdioden (IMPATT-Dioden)	68
7.2.4.3 BARITT-Dioden	71

7.2.4.4	Elektronentransfer-Elemente (Gunn-Elemente)	72
7.2.4.5	Heterostruktur-Tunneldioden	75
7.2.5	Gehäusebauformen und gehäuselose Chiptechniken	76
7.3	Bipolare Transistoren (G. Dittmer; H. L. Hartnagel; J. E. Müller)	78
7.3.1	Herstellungsverfahren und Aufbau von Transistoren	80
7.3.1.1	Diffusionsverfahren	81
7.3.1.2	Mesatransistor	81
7.3.1.3	Planartransistor	82
7.3.1.4	Epitaxieverfahren	83
7.3.1.4.1	Gasphasenepitaxie	83
7.3.1.4.2	Flüssigphasenepitaxie	84
7.3.1.4.3	Beschichtung im Vakuum	85
7.3.1.5	Ionenimplantation	85
7.3.2	Strom-Spannungs-Beziehungen (Ebers-Moll-Gleichungen)	85
7.3.3	Betriebsbereiche bipolarer Transistoren	87
7.3.3.1	Normalbetrieb (Emitterdiode in Durchlaßrichtung, Kollektordiode in Sperrrichtung gepolt)	87
7.3.3.2	Inverser Betrieb (Emitterdiode in Sperrrichtung, Kollektordiode in Durchlaßrichtung gepolt)	88
7.3.3.3	Sperrbetrieb (Emitter- und Kollektordiode in Sperrrichtung gepolt)	88
7.3.3.4	Flußbetrieb (Emitter- und Kollektordiode in Durchlaßrichtung gepolt)	89
7.3.4	Kennlinienfelder bipolarer Transistoren	89
7.3.4.1	Kennlinien $I_B = f(U_{BE})$ mit U_{CE} als Parameter	89
7.3.4.2	Kennlinien $I_C = f(U_{CE})$ mit I_B als Parameter	91
7.3.4.3	Kennlinien $I_C = f(U_B)$ mit U_{CE} als Parameter	92
7.3.4.4	Kennlinien $U_{BE} = f(U_{CE})$ mit I_B als Parameter	93
7.3.4.5	Aussteuerungsgrenzen im I_C , U_{CE} -Kennlinienfeld	94
7.3.5	Bipolare Transistoren als Verstärker im Kleinsignalbetrieb	95
7.3.5.1	Kleinsignalgleichungen	96
7.3.5.2	Kleinsignalersatzbilder	98
7.3.6	Übertragungseigenschaften einstufiger Transistorschaltungen	98
7.3.6.1	Übertragungsfaktoren	98
7.3.6.2	Grundschaltungen	99
7.3.7	Temperaturabhängigkeit und Temperaturstabilisierung bipolarer Transistoren	102
7.3.7.1	Temperatureinflüsse	102
7.3.7.2	Stabilisierungsmaßnahmen	104
7.3.8	Bipolare Transistoren bei höheren Frequenzen	106
7.3.8.1	Frequenzabhängigkeit des Stromübertragungsfaktors α und Grenzfrequenz f_α	106
7.3.8.2	Ersatzschaltbild nach Giacoletto	107
7.3.8.3	Grenzfrequenzen f_β und Beziehung zu f_α	108
7.3.8.4	Transitfrequenz f_T	109
7.3.8.5	Maximale Schwingfrequenz f_{max}	109
7.3.9	Bipolare Mikrowellentransistoren	110

7.3.9.1	Frequenzgrenzen durch verschiedene Zeitkonstanten (H. L. Hartnagel)	110
7.3.9.2	Technologie von bipolaren Mikrowellentransistoren (G. Dittmer)	111
7.3.9.2.1	Fingerstruktur	112
7.3.9.2.2	Overlaystruktur	112
7.3.9.2.3	Sonstige Strukturen	113
7.3.9.3	Zweitorparameter (Streuparameter) von Hochfrequenzverstärkern (G. Dittmer)	113
7.3.10	Heterobipolartransistoren (HBT) (J. E. Müller)	118
7.3.10.1	Prinzip, Aufbau und Herstellung	118
7.3.10.2	Vergleich der elektrischen Eigenschaften von HBT mit Si-Bipolartransistoren, MESFET und HEMT	120
7.3.10.3	Einsatzgebiete	124
7.4	Unipolare Transistoren (Feldeffekttransistoren) (J. E. Müller)	124
7.4.1	Prinzip, Ausführungsformen und Kennlinien	124
7.4.1.1	Typen, Aufbau und Herstellung	124
7.4.1.2	Wirkungsweise und Kennlinien	129
7.4.1.3	Temperaturverhalten	133
7.4.1.4	Aussteuerbereich	134
7.4.2	Kleinsignal-FET	135
7.4.2.1	Arbeitspunkteinstellung	135
7.4.2.2	Kleinsignalersatzschaltung	136
7.4.2.3	Grundschaltungen	138
7.4.2.4	Grenzfrequenz, Stabilität und Gewinn	141
7.4.2.5	Dual-Gate-FET	143
7.4.2.6	Rauschen von FETs	144
7.4.2.7	Entwicklungsstand von Kleinsignal-FETs	149
7.4.3	Leistungs-FETs	150
7.4.3.1	Kenngrößen	150
7.4.3.2	Kleinsignal- und Großsignal-Ersatzschaltung	150
7.4.3.3	Entwicklungsstand von Leistungs-FETs	152
7.5	Elektronen im Vakuum (H. Heynisch; K. Mayer; O. Zinke)	154
7.5.1	Mittlere freie Weglänge von Elektronen im Vakuum (O. Zinke)	154
7.5.2	Bewegung von Elektronen in elektrischen Feldern (O. Zinke)	155
7.5.3	Bewegung von Elektronen in magnetischen Feldern (O. Zinke)	157
7.5.3.1	Ablenkung von Elektronen im Magnetfeld	157
7.5.3.2	Bündelung von Elektronenstrahlen durch ein axial gerichtetes Magnetfeld	159
7.5.4	Elektronenemission aus Glühkathoden. Sättigungsstromgesetz (H. Heynisch; O. Zinke)	160
7.5.5	Emission durch hohe Feldstärke an der Oberfläche (Feldemission) (O. Zinke)	161
7.6	Hochvakuumröhren (H. Heynisch; K. Mayer; O. Zinke)	162
7.6.1	Stromspannungskennlinien von Dioden. Raumladungsgesetz	162
7.6.2	Trioden. Barkhausen-Formel	163
7.6.3	Hochvakuumröhren für Mikrowellenverstärker	165

7.7	Analoge Hochfrequenz-ICs (Integrated Circuits) (E. Pettenpaul)	167
7.7.1	Einleitung	167
7.7.2	Schaltungsentwurf	168
7.7.3	Passive Bauelemente und Netzwerke	171
7.7.3.1	Leitungselemente (Distributive Elemente)	171
7.7.3.2	Konzentrierte Elemente	172
7.7.3.3	Anpassungsnetzwerke, Filter und Koppler	176
7.7.4	Rechnergestützte Schaltungsentwicklung (CAD = Computer Aided Design)	178
7.7.5	Technologie der Schaltungen	180
7.7.5.1	Hybridschaltungen	180
7.7.5.2	Monolithische Schaltungen auf GaAs	181
7.8	Digitale Hochfrequenz-ICs (Integrated Circuits) (E. Pettenpaul)	183
7.8.1	Einleitung	183
7.8.2	Grundlagen des Schaltungsentwurfs	183
7.8.3	Schaltungen für logische Grundfunktionen	184
7.8.3.1	Diode-Transistor-Logik (DTL)	185
7.8.3.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL)	185
7.8.3.3	Emittergekoppelte Logik (ECL)	186
7.8.3.4	Integrierte Injektionslogik (I ² L)	186
7.8.3.5	NMOS-Logik	187
7.8.3.6	Komplementäre MOS-Logik (CMOSL)	187
7.8.3.7	FET-Logik mit Pufferschaltungen (BFL = Buffered FET Logic)	188
7.8.3.8	Schottkydioden-FET-Logik (SDFL)	188
7.8.3.9	Direkt gekoppelte FET-Logik (DCFL)	189
7.8.4	Vergleich der Logikschaltungen	189
7.8.5	Anwendungsbeispiele	192
7.8.5.1	Frequenzteiler, Flipflops	192
7.8.5.2	Kombinatorische Logik, Arithmetische Grundschaltungen	192
7.8.5.3	Speicher mit direktem Zugriff (RAM)	195
7.8.6	Technologie der Schaltungen	196
7.9	Literatur	197
8.	Störungen und Rauschen (A. Vlcek)	204
8.1	Rauschquellen	207
8.1.1	Grundbegriffe der Statistik	208
8.1.2	Schrotrauschen	215
8.1.2.1	Schrotrauschen in Vakuumdioden	216
8.1.2.2	Schrotrauschen in Halbleiterdioden	220
8.1.3	Thermisches Rauschen	221
8.1.3.1	Rauschen der Serien- oder Parallelschaltung von Widerständen auf verschiedenen Temperaturen	223
8.1.3.2	Rauschen eines Widerstandes mit Eigeninduktivität und Eigenkapazität	223

8.1.4	Weitere Rauschquellen	225
8.1.4.1	1/f -Rauschen	225
8.1.4.2	Generations- und Rekombinationsrauschen (G-R-Rauschen)	226
8.1.4.3	Influenzrauschen	226
8.1.4.4	Stromverteilungsrauschen	227
8.2	Das Rauschen in der Schaltung	227
8.2.1	Der rauschende, lineare Vierpol	227
8.2.2	Leistungsgewinn, Rauschfaktor und Rauschzahl von Vierpolen	229
8.2.3	Die Rauschtemperatur von Vierpolen	233
8.2.4	Kettenschaltung rauschender Vierpole	234
8.2.5	Das Rauschmaß und seine Bedeutung in Kettenschaltungen . .	235
8.3	Die Antennenrauschtemperatur	236
8.4	Beispiele	239
8.4.1	Rauschen einer bipolaren Transistorstufe und eines GaAs-MESFET	239
8.4.2	Dimensionierung einer Funkstrecke mit Rücksicht auf den Störabstand	241
8.4.3	Systemrauschtemperatur bei Berücksichtigung einer verlustbehafteten Leitung zwischen Antenne und Empfänger .	241
8.5	Literatur	242
9.	Verstärker (H. Brunswig; G. Dittmer; H. Döring; H. L. Hartnagel; H. Heynisch; K.-H. Gerrath; A. Müller; J. E. Müller; E. Pettenpaul; A. Richtscheid; W. Welsch; K.-H. Vöge; O. Zinke)	244
9.1	Kleinsignalverstärker	244
9.1.1	Grundschaltungen (G. Dittmer)	248
9.1.2	Gegenkopplung (G. Dittmer)	250
9.1.3	Neutralisation (A. Richtscheid)	252
9.1.3.1	Neutralisation von Transistorverstärkern	252
9.1.3.2	Neutralisation von Röhrenverstärkern	253
9.1.4	Gleichstromverstärker und Operationsverstärker (G. Dittmer)	254
9.1.5	RC-gekoppelte Verstärker (A. Richtscheid)	258
9.1.6	Übertragergekoppelte Verstärker (A. Richtscheid; O. Zinke) .	259
9.1.7	Selektive Verstärker (O. Zinke)	262
9.1.7.1	Einkreisverstärker	262
9.1.7.2	Mehrstufiger Selektivverstärker	265
9.1.7.3	Verstärker mit verschiedenen abgestimmten Kreisen (Verstimmungsfilterverstärker)	266
9.1.8	Reflexionsverstärker (K.-H. Gerrath)	270
9.1.8.1	Reflexionsverstärker mit Tunneldiode	271
9.1.8.2	Reflexionsverstärker mit Gunn-Elementen und Lawinenlaufzeitdioden	274

9.1.9	Leistungsanpassung und Stabilität (G. Dittmer)	275
9.1.10	Kleinsignalverstärker mit Feldeffekttransistoren (J. E. Müller)	278
9.1.10.1	Streuparameter eines GaAs-MESFET	278
9.1.10.2	Signalflußdiagramme	280
9.1.10.3	Leistungsgewinndefinitionen	283
9.1.10.3.1	Klemmenleistungsgewinn (power gain) G	283
9.1.10.3.2	Übertragungsgewinn (transducer power gain) G_T	284
9.1.10.3.3	Verfügbarer Leistungsgewinn (available power gain) G_A	285
9.1.10.3.4	Einfügungsgewinn (insertion gain) G_I	285
9.1.10.3.5	Maximaler Leistungsgewinn	285
9.1.10.4	Kreise konstanter Verstärkung	285
9.1.10.5	Stabilität	287
9.1.10.6	Entwurf von Mikrowellenverstärkern	294
9.1.11	Laser und Laserlicht (H. L. Hartnagel; W. Welsch)	297
9.1.11.1	Festkörperlaser (W. Welsch)	299
9.1.11.2	CO_2 -Laser (W. Welsch)	300
9.1.11.3	Halbleiterlaser (H. L. Hartnagel)	302
9.1.12	Optoelektronische Repeater (H. L. Hartnagel)	304
9.1.13	Integrierte Breitbandverstärker (E. Pettenpaul)	305
9.1.13.1	Gegengekoppelte Verstärker	305
9.1.13.2	Verstärker mit Anpassungsnetzwerk	308
9.1.13.3	Verstärker mit Gleichstrom-(DC-)Kopplung	309
9.1.13.4	Gegentaktverstärker mit 3-dB-Richtkopplern	309
9.1.13.5	Kenndaten und Ausblick	310
9.1.14	Integrierte Schaltungen rauscharmer GaAs-FET-Verstärker (E. Pettenpaul)	311
9.1.14.1	Schaltungsentwurf und Kenndaten	312
9.2	Großsignalverstärker	315
9.2.1	Verzerrungsarme Endverstärker mit Transistoren (A. Richtscheid)	316
9.2.1.1	Eintakt-A-Verstärker	316
9.2.1.2	Gegentakt-A-Verstärker	317
9.2.1.3	Gegentakt-B-Verstärker	317
9.2.2	Sendeverstärker mit Transistoren (A. Richtscheid)	319
9.2.2.1	Der Entwurf von transistorisierten Sendeverstärkern	319
9.2.2.2	Die Dimensionierung von transistorisierten Sendeverstärkern	320
9.2.2.2.1	Impedanzanpassung	321
9.2.2.2.2	Anpaßschaltungen	321
9.2.2.2.3	Stabilität	322
9.2.3	Verzerrungsarme Endverstärker mit Feldeffekttransistoren (GaAs FET Power Amplifiers) (J. E. Müller)	322
9.2.3.1	Streuparameter	322
9.2.3.2	Großsignaleigenschaften und nichtlineare Verzerrungen	324

9.2.3.2.1	Aussteuerungsabhängigkeit des Gewinns	324
9.2.3.2.2	Aussteuerungsabhängigkeit der Intermodulation	325
9.2.3.2.3	Lastabhängigkeit der Ausgangsleistung	326
9.2.3.2.4	Lastabhängigkeit der Intermodulation	328
9.2.3.3	Anpassungsnetzwerke	329
9.2.3.3.1	L-Transformation	330
9.2.3.3.2	$\lambda/4$ -Transformation	331
9.2.3.3.3	Verluste in Transformationsschaltungen	332
9.2.3.4	Leistungssummation (Power Combining)	333
9.2.3.5	Verstärkerentwurf	334
9.2.4	Übersteuerte Leistungsverstärker (Sendeverstärker mit Röhren) (H. Brunswig)	339
9.2.4.1	A-Verstärker	341
9.2.4.2	B- und AB-Verstärker	342
9.2.4.3	C-Verstärker	344
9.2.5	Verstärkerklystron (H. Döring)	347
9.2.6	Verstärker mit Wanderfeldröhren (H. Heynisch; A. Müller; K.-H. Vöge; O. Zinke)	354
9.3	Literatur	360
10.	Oszillatoren (Schwingungserzeugung) (H. Döring; K.-H. Gerrath; H. Heynisch; T. Motz; A. Müller; E. Pettenpaul; K.-H. Vöge; O. Zinke) . . .	366
10.1	Charakterisierung von selbsterregten Oszillatoren. Stabilitätskriterien (O. Zinke)	366
10.2	Zweipoloszillatoren vom S- und N-Typ (K.-H. Gerrath)	369
10.2.1	Tunneldioden-Oszillatoren	369
10.2.2	Elektronen-Transfer-Elemente (Gunn-Elemente) als Oszillatoren	373
10.2.3	Lawinenlaufzeit-Oszillatoren (Read- und IMPATT-Dioden) . .	375
10.3	Zweipoloszillatoren mit Laufzeitröhren	378
10.3.1	Vielschlitzklystron (Extended Interaction Klystron oder EIO = Extended Interaction Oscillator) (H. Döring)	379
10.3.2	Carcinotron (Rückwärtswellen-Oszillatator) (H. Heynisch; K.-H. Vöge; A. Müller)	383
10.3.3	Magnetron (H. Döring; A. Müller; K.-H. Vöge)	389
10.3.4	Gyrotron (H. Döring)	399
10.4	Vierpoloszillatoren	403
10.4.1	Allgemeines (T. Motz; O. Zinke)	403
10.4.2	LC-Oszillatoren (T. Motz; O. Zinke)	408
10.4.3	Frequenzstabilität (T. Motz)	413
10.4.3.1	Ursachen von Frequenzschwankungen	414
10.4.3.2	Kurz- und Langzeitstabilität	414
10.4.3.3	Phasensteilheit	415

10.4.4	Quarzoszillatoren (T. Motz; K.-H. Vöge)	418
10.4.4.1	Der Quarz als Resonator. Achsen und Schnitte (K.-H. Vöge)	418
10.4.4.2	Schwingungsformen von Schwingquarzen (T. Motz; K.-H. Vöge)	419
10.4.4.3	Temperaturgang der Frequenz von Quarzen (T. Motz)	421
10.4.4.4	Quarzersatzbild, Serien- und Parallelresonanz (K.-H. Vöge)	425
10.4.4.5	Frequenzbereich und Schwingertyp (T. Motz)	428
10.4.4.6	Oszillatoren mit AT-Grundton-Quarzen (T. Motz)	428
10.4.4.7	Schaltungen für AT-Oberton-Quarze (T. Motz)	431
10.4.4.8	Frequenzänderungen durch Ziehen der Quarzfrequenz (T. Motz)	432
10.4.4.9	Schaltungen für Oszillatoren mit Quarzen anderer Schnitte (T. Motz)	433
10.4.4.10	Einfluß der Quarzbelastung (T. Motz)	433
10.4.5	RC-Oszillatoren (Schwingbedingung) (T. Motz)	433
10.4.6	RC-Oszillatoren mit frequenzabhängiger Mitkopplung (T. Motz)	435
10.4.6.1	Phasensteilheit und Stabilitätsfaktor	435
10.4.6.2	Wien-Robinson-Oszillatoren	435
10.4.6.3	Oszillatoren mit RC-Abzweigsschaltungen	440
10.4.7	RC-Oszillatoren mit frequenzabhängiger Gegenkopplung (T. Motz)	440
10.4.7.1	RC-Oszillatoren mit überbrückten T-Schaltungen	440
10.4.7.2	RC-Oszillatoren mit Doppel-T-Schaltung	442
10.4.8	Stabilisierung der Schwingamplitude (T. Motz)	443
10.4.9	Integrierte Schaltungen für GaAs-FET-Oszillatoren (E. Pettenpaul)	443
10.4.9.1	Oszillatoren-Schaltungsentwurf	443
10.4.9.2	Oszillatoren mit dielektrischem Resonator	448
10.4.9.3	Kenndaten und Ausblick	448
10.4.10	Oszillatoren mit Oberflächenwellen-Resonatoren (OFW- oder SAW-Oszillatoren) (T. Motz)	450
10.4.10.1	Durch OFW-Eintor-Resonator stabilisierter Colpitts-Oszillatoren	451
10.4.10.2	Pierce-Oszillatoren mit OFW-Zweitor-Resonator	452
10.5	PLL-Oszillatoren (T. Motz)	453
10.5.1	Grundsätzliches zur Phasenregelschleife	453
10.5.2	Grundschaltung des PLL-Oszillators	453
10.5.2.1	Spannungsgesteuerter Oszillatoren	454
10.5.2.2	Schaltungen zum Phasenvergleich (Phasendetektoren)	455
10.5.2.3	Schleifenfilter (Loopfilter)	456
10.5.3	Erzeugung eines Frequenzrasters	457
10.5.3.1	PLL mit umschaltbarem Verteiler (2-modulus-Prescaler)	458
10.5.3.2	Mehrfachschleifensynthesizer (Gekoppelte Phasenregelschleifen)	460

10.5.3.3	PLL-Schaltungen mit nichtganzzahligen Teilverhältnissen (Fractional-N-PLL)	460
10.6	Direkte Digitale Frequenzsynthese (DDS) (T. Motz)	462
10.7	Literatur	464
11.	Mischung und Frequenzvervielfachung (H. Brunswig; K. Blankenburg; K.-H. Gerrath; K. Mayer; E. Pettenpaul; O. Zinke)	471
11.1	Einführung (H. Brunswig)	471
11.2	Anwendungen der Mischung (H. Brunswig)	472
11.2.1	Überlagerungsempfänger	472
11.2.2	Frequenzumsetzer für m- und dm-Wellen	473
11.3	Kombinationsfrequenzen bei nichtlinearen Bauelementen (K.-H. Gerrath; O. Zinke)	473
11.3.1	Kleinsignaltheorie der Mischung	477
11.3.2	Aufwärtsmischung, Abwärtsmischung, Gleichlage, Kehrlage .	481
11.4	Mischung mit Halbleiterdioden als nichtlinearen Widerständen (K. Blankenburg; K.-H. Gerrath)	482
11.4.1	Kleinsignalersatzschaltbild der Halbleiterdiode (K.-H. Gerrath)	482
11.4.2	Leistungsbeziehungen von Page und Pantell (K.-H. Gerrath) .	483
11.4.3	Mischung mit Serienschaltung der Steuerspannungen. Konversionsgleichungen (K.-H. Gerrath)	485
11.4.4	Betriebsleistungsverstärkung der Mischschaltung (K.-H. Gerrath)	487
11.4.5	Rauschfaktor des Mischers in Bandmitte (K.-H. Gerrath) . . .	489
11.4.6	Fourier-Koeffizienten des Leitwerts bei geknickter Dioden- Kennlinie. Eintaktmischer (K. Blankenburg; K.-H. Gerrath) .	490
11.4.7	Gegentakt- und Brückenmischer (Ringmodulator) (K. Blankenburg)	492
11.4.8	Doppelgegentaktmischer (K.-H. Gerrath)	494
11.5	Mischung mit Halbleiterdioden als nichtlinearen Kapazitäten (K.-H. Gerrath)	497
11.5.1	Leistungsbeziehungen von Manley und Rowe	497
11.5.2	Mischung mit Parallelschaltung der Steuerströme. Konversionsgleichungen	502
11.5.3	Betriebsleistungsverstärkung des Reaktanzmischers	505
11.5.4	Rauschtemperatur des Reaktanzmischers	506
11.5.5	Optimierung von Reaktanzmischern	507
11.5.6	Reaktanzmischer bei hohen Frequenzen	510
11.6	Mischung mit Transistoren (K. Blankenburg; K.-H. Gerrath) . . .	511
11.7	Frequenzvervielfachung und -teilung (K.-H. Gerrath; K. Mayer) .	515
11.7.1	Frequenzvervielfacher für analoge Signale (K.-H. Gerrath) .	515
11.7.2	Frequenzvervielfacher mit Sperrsichtvaraktor (K.-H. Gerrath)	516

11.7.3	Frequenzvervielfacher mit Speichervaraktor (K.-H. Gerrath)	519
11.7.4	Frequenzteiler für analoge Signale (K.-H. Gerrath)	520
11.7.5	Frequenzvervielfachung und -teilung digitaler Signale. Vergleich (K. Mayer)	521
11.8	Integrierte Schaltungen für GaAs-FET-Mischer (E. Pettenpaul)	521
11.8.1	Mischung mit GaAs-MESFETs	522
11.8.2	Mischer-Schaltungsentwurf	524
11.8.3	Kenndaten und Rückblick	526
11.9	Literatur	529
12.	Modulation, Tastung, Demodulation (H. Brunswig; K.-H. Gerrath; R. Jakoby; R. W. Lorenz; A. Vlcek; O. Zinke)	532
12.1	Einführung (O. Zinke)	532
12.2	Amplitudenmodulation	534
12.2.1	Zweiseitenband-Amplitudenmodulation mit Träger (O. Zinke)	534
12.2.2	Amplitudenmodulationsverfahren (H. Brunswig; O. Zinke)	539
12.2.2.1	Amplitudenmodulation mit gesteuerten passiven Elementen (O. Zinke)	539
12.2.2.2	Amplitudenmodulation mit gesteuerten Röhren (H. Brunswig)	540
12.2.3	Leistungssparende Amplitudenmodulationsverfahren (H. Brunswig)	542
12.2.4	Demodulationsverfahren für Amplitudenmodulation (O. Zinke)	544
12.2.4.1	Synchrodetektor (Kohärenzdetektor)	544
12.2.4.2	Linearer Gleichrichter und Hüllkurvendektor	546
12.2.5	Einseitenband-Amplitudenmodulation (EM) (R. W. Lorenz)	549
12.2.5.1	EM-Modulatoren	550
12.2.5.2	EM-Demodulation	554
12.2.6	Amplitudentastung (K.-H. Gerrath; O. Zinke)	556
12.3	Winkelmodulation (Frequenz- oder Phasenmodulation) (A. Vlcek; O. Zinke)	558
12.3.1	Grundbegriffe der Winkelmodulation (O. Zinke)	559
12.3.1.1	Phasenhub und Frequenzhub bei Winkelmodulation	560
12.3.1.2	Pendelzeigerdiagramm bei Winkelmodulation und Frequenzspektrum	560
12.3.2	Frequenzumtastung (FSK). Phasenumtastung (PSK) (O. Zinke)	561
12.3.2.1	Pendelzeigerdiagramme bei Umtastung	562
12.3.2.2	Frequenzspektrum und Bandbreite bei Frequenzumtastung (FSK)	563
12.3.2.3	Frequenzspektrum und Bandbreite bei Phasenumtastung (PSK)	570
12.3.3	Harmonische Winkelmodulation (O. Zinke)	572
12.3.3.1	Pendelzeigerdiagramm. Frequenz- und Phasenhub	572
12.3.3.2	Frequenzspektrum und Bandbreite bei harmonischer Winkelmodulation	573

12.3.3.3	Unsymmetrisches Spektrum bei Winkelmodulation	576
12.3.3.4	Unterschied zwischen Frequenzmodulation und Phasenmodulation	576
12.3.4	Unterdrückung von Störungen bei großem Modulationsindex (O. Zinke)	577
12.3.5	Modulationsverfahren für Frequenzmodulation (FM) (O. Zinke)	580
12.3.6	Modulationsverfahren für Phasenmodulation (PM) (O. Zinke)	582
12.3.7	Demodulationsverfahren für winkelmodulierte Schwingungen (O. Zinke)	584
12.3.8	Anwendung mehrerer Modulationsarten (Stereo-Rundfunk-Norm) (O. Zinke)	587
12.3.9	Quadraturmodulation (QAM) (A. Vlcek)	588
12.4	Pulsmodulation (H. Brunswig; O. Zinke)	592
12.4.1	Pulsmodulationsverfahren	594
12.4.2	Pulsdemodulationsverfahren	598
12.4.3	Zeitmultiplexverfahren	599
12.5	Frequenzspreizung (K.-H. Gerrath)	601
12.5.1	Bandbreite und Störabstand	601
12.5.2	Code-Spreizverfahren	602
12.5.3	Spreizcodes	604
12.5.4	Codemultiplex	606
12.6	Verhalten von amplitudenmodulierten und winkelmodulierten Systemen bei Rauschstörungen (A. Vlcek)	607
12.6.1	Mathematische Beschreibung von Bandpaßrauschen (A. Vlcek)	607
12.6.2	Rauschen in amplitudenmodulierten Systemen (A. Vlcek)	608
12.6.2.1	Rauschen beim Hüllendetektor	609
12.6.2.2	Rauschen beim Synchrodetektor	610
12.6.2.3	Vergleich der verschiedenen Amplitudensmodulationsverfahren	610
12.6.3	Rauschen in winkelmodulierten Systemen (A. Vlcek)	612
12.7	Geräusch in pulsmodulierten Systemen (A. Vlcek)	615
12.7.1	Wertkontinuierliche Pulsmodulationen	616
12.7.2	Wertdiskrete Modulationen	617
12.7.2.1	Detektion von binären Impulsen	617
12.7.2.2	Quantisierungsgeräusch	619
12.8	Digitale Modulationsverfahren in Funkübertragungssystemen (R. Jakoby)	622
12.8.1	Intersymbolinterferenzfreie, bandbegrenzte Übertragung	626
12.8.2	Lineare Modulationsverfahren	630
12.8.2.1	Kohärente Phasenumtastverfahren	631
12.8.2.2	Phasenumtastung mit differentieller Zustandscodierung	638
12.8.2.3	Einfluß von Bandbegrenzung und Nichtlinearitäten auf die QPSK-Übertragung	639
12.8.3	Modulationsverfahren mit konstanter Hüllkurve	644

12.8.4 Einfluß der Mehrwegeausbreitung auf die Bitfehlerwahrscheinlichkeit	652
12.8.5 Vergleich der Bandbreite- und Leistungseffizienz	654
12.9 Literatur	657
Anhang	661
A. Integraltransformationen (A. Vlcek)	661
A.1 Die Impulsfunktion $\delta(x)$	661
A.2 Die Fourier-Transformation	663
A.3 Lineare Systeme	665
A.4 Die Hilbert-Transformation	667
B. Die Radargleichung für Primärradar (A. Vlcek)	667
Literatur zu Anhang A	669
Sachverzeichnis	671

**Inhalt des ersten Bandes, 5. Auflage
Hochfrequenzfilter, Leitungen, Antennen**

1. Schwingkreise, Zweipole, Koppelfilter aus konzentriert und passiv wirkenden Bauelementen
2. Ausbreitung von Lecher-Wellen auf Leitungen und Kabeln
3. Hochfrequenztransformatoren und Symmetrierglieder
4. Eigenschaften und Dimensionierung von Koaxialkabeln, Streifenleitungen, Finleitungen, Richtkopplern und Hochfrequenzfiltern
5. Feldmäßige Darstellung der Ausbreitung längs Wellenleitern
6. Elektromagnetische Strahlung und Antennen

Anhang: Einführung in einige Begriffe der Vektorrechnung