

## 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

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://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

<b>7. Halbleiter, Halbleiterbauelemente und Elektronenröhren</b> (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 Durchbruchmechanismen	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 Speichervariaktoren	53
7.2.3.2 Kapazitätsdioden und Sperrschichtvariaktoren	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-Tunnelndioden . . . . .	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	Grundsaltungen . . . . .	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 $\alpha$ und Grenzfrequenz $f_\alpha$ . . . . .	106
7.3.8.2	Ersatzschaltbild nach Giacioletto . . . . .	107
7.3.8.3	Grenzfrequenzen $f_\beta$ und Beziehung zu $f_\alpha$ . . . . .	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	Zweitordparameter (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	Grundsaltungen . . . . .	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	Dioden-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 ( $I^2L$ )	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
<b>8.</b>	<b>Störungen und Rauschen (A. Vlcek)</b>	<b>204</b>
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
<b>9.</b>	<b>Verstärker</b> (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	Übertrageregekoppelte 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 verschieden 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 <sub>2</sub> -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 Sende- verstärkern . . . . .	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
<b>10.</b>	<b>Oszillatoren</b> (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-Oszillator) (H. Heynisch; K.-H. Vöge; A. Müller) . . . . .	383
10.3.3	Magnetron (H. Döring; A. Müller; K.-H. Vöge) . . . . .	389
10.3.4	Gyrottron (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-Oszillator	435
10.4.6.3	Oszillatoren mit RC-Abzweigschaltungen	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	Oszillator-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-Oszillator	451
10.4.10.2	Pierce-Oszillator mit OFW-Zweitord-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 Oszillator	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 Vorteiler (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
<b>11.</b>	<b>Mischung und Frequenzvervielfachung</b> (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 Sperrschichtvaraktor (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
<b>12.</b>	<b>Modulation, Tastung, Demodulation</b> (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	Synchrondetektor (Kohärentdetektor)	544
12.2.4.2	Linearer Gleichrichter und Hüllkurvendetektor	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 Synchrondetektor . . . . .	610
12.6.2.3	Vergleich der verschiedenen Amplituden- modulationsverfahren . . . . .	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 Zustands- codierung . . . . .	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 Bitfehler- wahrscheinlichkeit . . . . .	652
12.8.5	Vergleich der Bandbreite- und Leistungseffizienz . . . . .	654
12.9	Literatur . . . . .	657
<b>Anhang</b>	. . . . .	<b>661</b>
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
<b>Sachverzeichnis</b>	. . . . .	<b>671</b>

### **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