

Inhaltsverzeichnis

7. Halbleiter, Halbleiterbauelemente und Elektronenröhren (H.L. Hartnagel; O. Zinke; A. Vlcek)	1
7.1 Physikalische Eigenschaften von Halbleitern (H.L. Hartnagel; O. Zinke; A. Vlcek)	2
7.1.1 Leitfähigkeit von Halbleitern	3
7.1.2 Eigenleitung von Halbleitern (Ge, Si, GaAs)	4
7.1.3 Störstellenleitung (Dotierung)	6
7.1.4 Die Schrödingergleichung (A. Vlcek)	7
7.1.5 Bändermodell von Halbleitern	20
7.1.6 Trägerdichte als Funktion der Zustandsdichte und der Fermi-Verteilung	22
7.1.7 Der Elektronentransfer-Effekt (H.L. Hartnagel)	23
7.2 Halbleiterbauelemente mit zwei Elektroden (Dioden und Gunn-Elemente) (R. Losehand; O. Zinke)	25
7.2.1 Der p-n-Übergang	25
7.2.1.1 Überblick: Der p-n-Übergang ohne äußere Spannung (O. Zinke)	25
7.2.1.2 Bändermodell, Ladungen, Feldstärke und Potential im p-n-Übergang	27
7.2.1.3 Statische Kennlinie des p-n-Übergangs	31
7.2.1.4 Durchbruchmechanismen	36
7.2.2 Der Metall-Halbleiter-Übergang	39
7.2.2.1 Ladungen und Potential im Metall-Halbleiter-Übergang	39
7.2.2.2 Statische Kennlinie des Metall-Halbleiter-Übergangs	41
7.2.2.3 Der Metall-Halbleiter-Übergang als Ohmscher Kontakt	44
7.2.2.4 Übergänge in Heterostrukturen	46
7.2.3 Hochfrequenzdioden	47
7.2.3.1 PIN-Dioden und Speichervariaktoren	48
7.2.3.2 Kapazitätsdioden und Sperrschichtvariaktoren	53
7.2.3.3 Schottkydioden	55
7.2.3.4 Hochfrequenz-Photodioden	58
7.2.4 Dioden für Hochfrequenzoszillatoren	60
7.2.4.1 Tunneldioden	60
7.2.4.2 Lawinenlaufzeitdioden (IMPATT-Dioden)	61
7.2.4.3 BARITT-Dioden	64
7.2.4.4 Elektronentransfer-Elemente (Gunn-Elemente)	65
7.2.4.5 Heterostruktur-Tunneldioden	68
7.2.5 Gehäusebauformen und gehäuselose Chiptechniken	69
7.3 Bipolare Transistoren (G. Dittmer; H.L. Hartnagel)	71
7.3.1 Herstellungsverfahren und Aufbau von Transistoren	72

7.3.1.1	Diffusionsverfahren	73
7.3.1.2	Mesatransistor	73
7.3.1.3	Planartransistor	73
7.3.1.4	Epitaxieverfahren	74
7.3.1.4.1	Gasphasenepitaxie	75
7.3.1.4.2	Flüssigphasenepitaxie	75
7.3.1.4.3	Beschichtung im Vakuum	76
7.3.1.5	Ionenimplantation	77
7.3.2	Strom-Spannungs-Beziehungen (Ebers-Moll-Gleichungen)	77
7.3.3	Betriebsbereiche bipolarer Transistoren	78
7.3.3.1	Normalbetrieb (Emittordiode in Durchlaßrichtung, Kollektordiode in Sperrichtung gepolt)	78
7.3.3.2	Inverser Betrieb (Emittordiode in Sperrichtung, Kollektordiode in Durchlaßrichtung gepolt)	79
7.3.3.3	Sperrbetrieb (Emitter- und Kollektordiode in Sperrichtung gepolt)	79
7.3.3.4	Flußbetrieb (Emitter- und Kollektordiode in Durchlaßrichtung gepolt)	80
7.3.4	Kennlinienfelder bipolarer Transistoren	80
7.3.4.1	Kennlinien $I_B = f(U_{BE})$ mit U_{CE} als Parameter	80
7.3.4.2	Kennlinien $I_C = f(U_{CE})$ mit I_B als Parameter	82
7.3.4.3	Kennlinien $I_C = f(U_B)$ mit U_{CE} als Parameter	83
7.3.4.4	Kennlinien $U_{BE} = f(U_{CE})$ mit I_B als Parameter	84
7.3.4.5	Aussteuerungsgrenzen im I_C, U_{CE} -Kennlinienfeld	84
7.3.5	Bipolare Transistoren als Verstärker im Kleinsignalbetrieb	86
7.3.5.1	Kleinsignalgleichungen	86
7.3.5.2	Kleinsignalersatzbilder	87
7.3.6	Übertragungseigenschaften einstufiger Transistorschaltungen	88
7.3.6.1	Übertragungsfaktoren	88
7.3.6.2	Grundsaltungen	88
7.3.7	Temperaturabhängigkeit und Temperaturstabilisierung bipolarer Transistoren	91
7.3.7.1	Temperatureinflüsse	91
7.3.7.2	Stabilisierungsmaßnahmen	93
7.3.8	Bipolare Transistoren bei höheren Frequenzen	95
7.3.8.1	Frequenzabhängigkeit des Stromübertragungsfaktors α und Grenzfrequenz f_α	95
7.3.8.2	Ersatzschaltbild nach Giacoletto	95
7.3.8.3	Grenzfrequenzen f_β und Beziehung zu f_α	96
7.3.8.4	Transitfrequenz f_T	97
7.3.8.5	Maximale Schwingfrequenz f_{max}	97
7.3.9	Bipolare Mikrowellentransistoren	98
7.3.9.1	Frequenzgrenzen durch verschiedene Zeitkonstanten (H.L. Hartnagel)	98
7.3.9.2	Technologie von bipolaren Mikrowellentransistoren (G. Dittmer)	99
7.3.9.2.1	Fingerstruktur	100
7.3.9.2.2	Overlaystruktur	100
7.3.9.2.3	Sonstige Strukturen	100
7.3.9.3	Zweitordparameter (Streuparameter) von Hochfrequenzverstärkern (G. Dittmer)	101
7.3.9.4	Das Heterostruktur-Verfahren (H.L. Hartnagel)	105
7.3.10	Heterobipolartransistoren	106

7.4	Unipolare Transistoren (Feldeffekttransistoren) (J.E. Müller)	107
7.4.1	Prinzip, Ausführungsformen und Kennlinien	107
7.4.1.1	Typen, Aufbau und Herstellung	107
7.4.1.2	Wirkungsweise und Kennlinien	111
7.4.1.3	Temperaturverhalten	115
7.4.1.4	Aussteuerbereich	116
7.4.2	Kleinsignal-FET	117
7.4.2.1	Arbeitspunkteinstellung	117
7.4.2.2	Kleinsignalersatzschaltung	117
7.4.2.3	Grundschaltung	120
7.4.2.4	Grenzfrequenz, Stabilität und Gewinn	122
7.4.2.5	Dual-Gate-FET	124
7.4.2.6	Rauschen von FETs	125
7.4.2.7	Entwicklungsstand von Kleinsignal-FETs	132
7.5	Elektronen im Vakuum (O. Zinke; H. Heynisch)	133
7.5.1	Begriffe der Vakuumtechnik (O. Zinke)	134
7.5.1.1	Mittlere freie Weglänge von Elektronen im Vakuum (O. Zinke)	134
7.5.1.2	Vakuumpumpen und Getter (H. Heynisch; O. Zinke)	135
7.5.2	Bewegung von Elektronen in elektrischen Feldern (O. Zinke)	135
7.5.2.1	Bewegung senkrecht zu den Potentialflächen	135
7.5.2.2	Trägheit und Laufzeit der Elektronen	137
7.5.3	Bewegung von Elektronen in magnetischen Feldern (O. Zinke)	137
7.5.3.1	Ablenkung von Elektronen im Magnetfeld	138
7.5.3.2	Bündelung von Elektronenstrahlen durch ein axial gerichtetes Magnetfeld	139
7.5.4	Elektronenemission aus Glühkathoden. Sättigungsstromgesetz (H. Heynisch; O. Zinke)	140
7.5.5	Emission von Sekundärelektronen (O. Zinke)	141
7.5.6	Emission durch hohe Feldstärke an der Oberfläche (Feldemission) (O. Zinke)	142
7.6	Hochvakuumdioden (O. Zinke)	142
7.6.1	Aufbau von Kathoden und Anoden	142
7.6.1.1	Kathoden mit direkter Heizung	143
7.6.1.2	Kathoden mit indirekter Heizung	143
7.6.1.3	Anoden	144
7.6.2	Stromspannungskennlinien von Dioden	144
7.6.2.1	Das Raumladungsgesetz	144
7.6.2.2	Hochvakuumdiode im Sperrbereich (Röhre als Gleichstromerzeuger)	145
7.7	Hochvakuumtrioden (O. Zinke)	145
7.7.1	Rückführung auf die Ersatzdiode	145
7.7.2	Kennlinienfelder der Triode	147
7.7.2.1	Das i_a, u_g -Kennlinienfeld	147
7.7.2.2	Das i_a, u_a -Kennlinienfeld	150
7.7.2.3	Das u_g, u_a -Kennlinienfeld ($i_a = \text{const}$)	151
7.7.3	Aufteilung des Kathodenstroms bei positivem Gitter und positiver Anode	151
7.7.4	Verstärkung und Arbeitskennlinien im i_a, u_a -Kennlinienfeld	152
7.7.5	Leitwertgleichungen und Hochfrequenz-Leitwertparameter in Kathodengrundschaltung	153

7.8	Hochvakuumtetroden (O. Zinke)	155
7.8.1	Kennlinien von Tetroden	156
7.9	Hochvakuumpentoden (O. Zinke)	158
7.10	Übersicht über Hochvakuumröhren für Mikrowellenverstärker (O. Zinke; H. Heynisch)	158
7.10.1	Trioden und Tetroden bei hohen Frequenzen (bis ≈ 2000 MHz) (H. Heynisch; O. Zinke)	158
7.10.2	Scheiben-Trioden für Mikrowellen ($f \approx 500$ bis 5000 MHz) (H. Heynisch; O. Zinke)	159
7.10.3	Wanderfeldröhren und Klystrons als Endverstärker bei Mikrowellen (O. Zinke)	160
7.11	Übersicht über Hochvakuum-Photozellen, Röntgenröhren und Bildröhren (O. Zinke)	161
7.12	Analoge Hochfrequenz-ICs (Integrated Circuits) (E. Pettenpaul)	164
7.12.1	Einleitung	164
7.12.2	Schaltungsentwurf	165
7.12.3	Passive Bauelemente und Netzwerke	167
7.12.3.1	Leitungselemente (Distributive Elemente)	167
7.12.3.2	Konzentrierte Elemente	169
7.12.3.3	Anpassungsnetzwerke, Filter und Koppler	171
7.12.4	Rechnergestützte Schaltungsentwicklung (CAD = Computer Aided Design)	173
7.12.5	Technologie der Schaltungen	175
7.12.5.1	Hybridschaltungen	175
7.12.5.2	Monolithische Schaltungen auf GaAs	175
7.13	Digitale Hochfrequenz-ICs (Integrated Circuits) (E. Pettenpaul)	177
7.13.1	Einleitung	177
7.13.2	Grundlagen des Schaltungsentwurfs	177
7.13.3	Schaltungen für logische Grundfunktionen	178
7.13.3.1	Dioden-Transistor-Logik (DTL)	179
7.13.3.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL)	179
7.13.3.3	Emittergekoppelte Logik (ECL)	180
7.13.3.4	Integrierte Injektionslogik (I^2L)	180
7.13.3.5	NMOS-Logik	180
7.13.3.6	Komplementäre MOS-Logik (CMOSL)	181
7.13.3.7	FET-Logik mit Pufferschaltungen (BFL = Buffered FET Logic)	181
7.13.3.8	Schottkydioden-FET-Logik (SDFL)	182
7.13.3.9	Direkt gekoppelte FET-Logik (DCFL)	182
7.13.4	Vergleich der Logikschaltungen	183
7.13.5	Anwendungsbeispiele	185
7.13.5.1	Frequenzteiler Flipflops	185
7.13.5.2	Kombinatorische Logik, Arithmetische Grundschaltungen	186
7.13.5.3	Speicher mit direktem Zugriff (RAM)	187
7.13.6	Technologie der Schaltungen	188
7.14	Literatur	190
8.	Störungen und Rauschen (A. Vlcek)	196
8.1	Rauschquellen	199

8.1.1	Grundbegriffe der Statistik	199
8.1.2	Schrotrauschen	207
8.1.2.1	Schrotrauschen in Vakuumdioden	207
8.1.2.2	Schrotrauschen in Halbleiterdioden	211
8.1.3	Thermisches Rauschen	212
8.1.3.1	Rauschen der Serien- oder Parallelschaltung von Widerständen auf verschiedenen Temperaturen	214
8.1.3.2	Rauschen eines Widerstandes mit Eigeninduktivität und Eigenkapazität	214
8.1.4	Weitere Rauschquellen	215
8.1.4.1	1/f-Rauschen	215
8.1.4.2	Generations- und Rekombinationsrauschen (G-R-Rauschen)	216
8.1.4.3	Influenzrauschen	216
8.1.4.4	Stromverteilungsrauschen	217
8.2	Das Rauschen in der Schaltung	217
8.2.1	Der rauschende, lineare Vierpol	217
8.2.2	Leistungsgewinn, Rauschfaktor und Rauschzahl von Vierpolen	219
8.2.3	Die Rauschtemperatur von Vierpolen	223
8.2.4	Kettenschaltung rauschender Vierpole	223
8.2.5	Das Rauschmaß und seine Bedeutung in Kettenschaltungen	224
8.3	Die Antennenrauschtemperatur	225
8.4	Beispiele	228
8.4.1	Rauschen einer bipolaren Transistorstufe und eines GaAs-MESFET	228
8.4.2	Dimensionierung einer Funkstrecke mit Rücksicht auf den Störabstand	229
8.4.3	Systemrauschtemperatur bei Berücksichtigung einer verlustbehafteten Leitung zwischen Antenne und Empfänger	230
8.5	Literatur	231
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)	232
9.1	Kleinsignalverstärker	232
9.1.1	Grundschaltungen (G. Dittmer)	236
9.1.2	Gegenkopplung (G. Dittmer)	238
9.1.3	Neutralisation (A. Richtscheid)	239
9.1.3.1	Neutralisation von Transistorverstärkern	240
9.1.3.2	Neutralisation von Röhrenverstärkern	240
9.1.4	Gleichstromverstärker und Operationsverstärker (G. Dittmer)	241
9.1.5	RC-gekoppelte Verstärker (A. Richtscheid)	244
9.1.6	Übertragergekoppelte Verstärker (A. Richtscheid; O. Zinke)	246
9.1.7	Selektive Verstärker (O. Zinke)	248
9.1.7.1	Einkreisverstärker	249
9.1.7.2	Mehrstufiger Selektivverstärker	251
9.1.7.3	Verstärker mit verschiedenen abgestimmten Kreisen (Verstimmungsfiltersverstärker)	252
9.1.8	Reflexionsverstärker (K.-H. Gerrath)	255
9.1.8.1	Reflexionsverstärker mit Tunnelodiode	257

9.1.8.2	Reflexionsverstärker mit Gunn-Elementen und Lawinenlaufzeitdioden	259
9.1.9	Leistungsanpassung und Stabilität (G. Dittmer)	260
9.1.10	Kleinsignalverstärker mit Feldeffekttransistoren (J.E. Müller)	262
9.1.10.1	Streuparameter eines GaAs-MESFET	263
9.1.10.2	Signalflußdiagramme	265
9.1.10.3	Leistungsgewinndefinitionen	267
9.1.10.3.1	Klemmenleistungsgewinn (power gain) G	268
9.1.10.3.2	Übertragungsgewinn (transducer power gain) G_T	268
9.1.10.3.3	Verfügbarer Leistungsgewinn (available power gain) G_A	269
9.1.10.3.4	Einfügungsgewinn (insertion gain) G_I	269
9.1.10.3.5	Maximaler Leistungsgewinn	269
9.1.10.4	Kreise konstanter Verstärkung	269
9.1.10.5	Stabilität	271
9.1.10.6	Entwurf von Mikrowellenverstärkern mit GaAs-MESFETs	277
9.1.11	Maser und Laser (H.L. Hartnagel; A. Müller; W. Welsch)	280
9.1.11.1	Festkörperlaser (A. Müller; W. Welsch)	283
9.1.11.2	Gaslaser (A. Müller; W. Welsch)	284
9.1.11.3	Halbleiterlaser (H.L. Hartnagel)	284
9.1.12	Optoelektronische Repeater (H.L. Hartnagel)	286
9.1.13	Integrierte Breitbandverstärker (E. Pettenpaul)	288
9.1.13.1	Gegengekoppelte Verstärker	288
9.1.13.2	Verstärker mit Anpassungsnetzwerk	290
9.1.13.3	Verstärker mit Gleichstrom-(DC)-Kopplung	291
9.1.13.4	Gegentakstverstärker mit 3-dB-Richtkopplern	292
9.1.13.5	Kenndaten und Ausblick	292
9.1.14	Integrierte Schaltungen rauscharmer GaAs FET-Verstärker (E. Pettenpaul)	294
9.1.14.1	Schaltungsentwurf und Kenndaten	294
9.2	Großsignalverstärker	297
9.2.1	Verzerrungsarme Endverstärker mit Transistoren (A. Richtscheid)	298
9.2.1.1	Eintakt-A-Verstärker	298
9.2.1.2	Gegentakst-A-Verstärker	299
9.2.1.3	Gegentakst-B-Verstärker	299
9.2.2	Sendeverstärker mit Transistoren (A. Richtscheid)	300
9.2.2.1	Der Entwurf von transistorisierten Sendeverstärkern	301
9.2.2.1.1	Impedanzanpassung	302
9.2.2.1.2	Anpaßschaltung	303
9.2.2.1.3	Stabilität	303
9.2.3	Verzerrungsarme Endverstärker mit Feldeffekttransistoren (GaAs FET Power Amplifiers) (J.E. Müller)	304
9.2.3.1	Streuparameter	304
9.2.3.2	Großsignaleigenschaften und nichtlineare Verzerrung	305
9.2.3.2.1	Aussteuerungsabhängigkeit des Gewinns	305
9.2.3.2.2	Aussteuerungsabhängigkeit der Intermodulation	306
9.2.3.2.3	Lastabhängigkeit der Ausgangsleistung	307
9.2.3.2.4	Lastabhängigkeit der Intermodulation	308
9.2.3.3	Anpassungsnetzwerke	309
9.2.3.3.1	L-Transformation	310
9.2.3.3.2	$\lambda/4$ -Transformation	311
9.2.3.3.3	Verluste in Transformationsschaltungen	311

9.2.3.4	Leistungssummutation (Power Combining)	313
9.2.3.5	Verstärkerentwurf	314
9.2.4	Übersteuerte Leistungsverstärker (Sendeverstärker mit Röhren) (H. Brunswig)	319
9.2.4.1	A-Verstärker	320
9.2.4.2	B- und AB-Verstärker	321
9.2.4.3	C-Verstärker	323
9.2.5	Verstärkerklystron (H. Döring)	325
9.2.6	Verstärker mit Wanderfeldröhren (H. Heynisch; A. Müller; K.-H. Vöge; O. Zinke)	332
9.3	Literatur	337
10.	Oszillatoren (Schwingungserzeugung) (H. Döring; K.-H. Gerrath; H. Heynisch; T. Motz; A. Müller; E. Pettenpaul; K.-H. Vöge; O. Zinke) ..	342
10.1	Charakterisierung von selbsterregten Oszillatoren. Stabilitätskriterien (O. Zinke)	342
10.2	Zweipoloszillatoren vom S- und N-Typ (K.-H. Gerrath)	345
10.2.1	Tunneldioden-Oszillatoren	345
10.2.2	Elektronen-Transfer-Elemente (Gunn-Elemente) als Oszillatoren ...	348
10.2.3	Lawinenlaufzeit-Oszillatoren (Read- und IMPATT-Dioden)	350
10.3	Zweipoloszillatoren mit Laufzeitröhren	353
10.3.1	Reflexklystron (H. Döring)	354
10.3.2	Vielschlitzklystron (Extended Interaction Klystron oder EIO = Extended Interaction Oscillator) (H. Döring)	357
10.3.3	Carcinotron (Rückwärtswellen-Oszillator) (H. Heynisch; K.-H. Vöge; A. Müller)	361
10.3.4	Magnetron (H. Döring; A. Müller; K.-H. Vöge)	366
10.3.5	Gyrottron (H. Döring)	375
10.4	Vierpoloszillatoren	379
10.4.1	Allgemeines (T. Motz; O. Zinke)	379
10.4.2	LC-Oszillatoren (T. Motz; O. Zinke)	383
10.4.3	Frequenzstabilität (T. Motz)	387
10.4.3.1	Ursachen von Frequenzschwankungen	388
10.4.3.2	Kurz- und Langzeitstabilität	388
10.4.3.3	Phasensteilheit	389
10.4.4	Quarzoszillatoren (T. Motz; K.-H. Vöge)	391
10.4.4.1	Der Quarz als Resonator. Achsen und Schnitte (K.-H. Vöge) ..	391
10.4.4.2	Schwingungsformen von Schwingquarzen (T. Motz; K.-H. Vöge)	392
10.4.4.3	Temperaturgang der Frequenz von Quarzen (T. Motz)	394
10.4.4.4	Quarzersatzbild, Serien- und Parallelresonanz (K.-H. Vöge) ..	398
10.4.4.5	Frequenzbereich und Schwingertyp (T. Motz)	401
10.4.4.6	Oszillatoren mit AT-Grundton-Quarzen (T. Motz)	401
10.4.4.7	Schaltungen für AT-Oberton-Quarze (T. Motz)	403
10.4.4.8	Frequenzänderungen durch Ziehen der Quarzfrequenz (T. Motz)	404
10.4.4.9	Schaltungen für Oszillatoren mit SC-Quarzen (T. Motz) ..	405
10.4.4.10	Schaltungen für Oszillatoren mit Biege-, Längs- und Flächenscherswingern (T. Motz)	406

10.4.4.11 Einfluß der Quarzbelastung (T. Motz)	407
10.4.5 RC-Oszillatoren (Schwingbedingung) (T. Motz)	407
10.4.6 RC-Oszillatoren mit frequenzabhängiger Mitkopplung (T. Motz) ...	408
10.4.6.1 Phasensteilheit und Stabilitätsfaktor	409
10.4.6.2 Wien-Robinson-Oszillator	409
10.4.6.3 Oszillatoren mit RC-Abzweigeschaltungen	413
10.4.7 RC-Oszillatoren mit frequenzabhängiger Gegenkopplung (T. Motz) .	417
10.4.7.1 RC-Oszillatoren mit überbrückten T-Schaltungen	417
10.4.7.2 RC-Oszillatoren mit Doppel-T-Schaltung	419
10.4.8 Stabilisierung der Schwingamplitude (T. Motz)	421
10.4.8.1 Begrenzung der Amplitude durch ein aktives Element der Oszillatorschaltung	421
10.4.8.2 Amplitudenstabilisierung durch nichtlineare Elemente in der äußeren Schaltung	422
10.4.9 Integrierte Schaltungen für GaAs-FET-Oszillatoren (E. Pettenpaul) .	424
10.4.9.1 Oszillator-Schaltungsentwurf	424
10.4.9.2 Oszillatoren mit dielektrischem Resonator	428
10.4.9.3 Kenndaten und Ausblick	429
10.5 Literatur	430
11. Mischung und Frequenzvervielfachung (H. Brunswig; K. Blankenburg; K.-H. Gerrath; O. Zinke)	436
11.1 Einführung (H. Brunswig)	436
11.2 Anwendungen der Mischung (H. Brunswig)	437
11.2.1 Überlagerungsempfänger	437
11.2.2 Frequenzumsetzer für m- und dm-Wellen	437
11.3 Kombinationsfrequenzen bei nichtlinearen Bauelementen (K.-H. Gerrath; O. Zinke)	438
11.3.1 Kleinsignaltheorie der Mischung	441
11.3.2 Aufwärtsmischung, Abwärtsmischung, Gleichlage, Kehrlage	445
11.4 Mischung mit Halbleiterdioden als nichtlinearen Widerständen (K.-H. Gerrath)	446
11.4.1 Kleinsignalersatzschaltbild der Halbleiterdiode	446
11.4.2 Leistungsbeziehungen von Page und Pantell	447
11.4.3 Mischung mit Serienschaltung der Steuerspannungen. Konversionsgleichungen	448
11.4.4 Betriebsleistungsverstärkung der Mischschaltung	450
11.4.5 Rauschfaktor des Mischers in Bandmitte	452
11.4.6 Fourier-Koeffizienten des Leitwerts bei geknickter Dioden-Kennlinie. Eintaktmischer (K. Blankenburg und K.-H. Gerrath)	453
11.4.7 Gegentakt- und Brückenmischer (Ringmodulator) (K. Blankenburg) ..	455
11.4.8 Doppelgegentaktmischer (K.-H. Gerrath)	457
11.5 Mischung mit Halbleiterdioden als nichtlinearen Kapazitäten (K.-H. Gerrath)	459
11.5.1 Leistungsbeziehungen von Manley und Rowe	459
11.5.2 Mischung mit Parallelschaltung der Steuerströme. Konversionsgleichungen	463
11.5.3 Betriebsleistungsverstärkung des Reaktanzmischers	466
11.5.4 Rauschtemperatur des Reaktanzmischers	467
11.5.5 Optimierung von Reaktanzmischern	468

11.5.6 Reaktanzmischer bei hohen Frequenzen	470
11.5.7 Reaktanzverstärker (Parametrischer Verstärker)	471
11.6 Mischung mit Transistoren (K. Blankenburg; K.-H. Gerrath)	473
11.7 Frequenzvervielfachung und -teilung (K.H. Gerrath)	476
11.7.1 Frequenzvervielfacher	476
11.7.2 Frequenzvervielfacher mit Sperrschichtvaraktor	477
11.7.3 Frequenzvervielfacher mit Speichervaraktor	480
11.7.4 Frequenzteiler	481
11.8 Integrierte Schaltungen für GaAs-FET-Mischer (E. Pettenpaul)	482
11.8.1 Mischung mit GaAs-MESFETs	482
11.8.2 Mischer-Schaltungsentwurf	485
11.8.3 Kenndaten und Rückblick	487
11.9 Literatur	489
12. Modulation, Tastung, Demodulation (H. Brunswig; K.-H. Gerrath; R.W. Lorenz; A. Vlcek; O. Zinke)	491
12.1 Einführung (O. Zinke)	491
12.2 Amplitudenmodulation	493
12.2.1 Zweiseitenband-Amplitudenmodulation mit Trägern (O. Zinke)	493
12.2.2 Amplitudenmodulationsverfahren (H. Brunswig; O. Zinke)	498
12.2.2.1 Amplitudenmodulation mit gesteuerten passiven Elementen (O. Zinke)	498
12.2.2.2 Amplitudenmodulation mit gesteuerten Röhren (H. Brunswig)	498
12.2.3 Leistungssparende Amplitudenmodulationsverfahren (H. Brunswig) .	500
12.2.4 Demodulationsverfahren für Amplitudenmodulation (O. Zinke)	502
12.2.4.1 Synchrondetektor (Kohärentdetektor)	502
12.2.4.2 Linearer Gleichrichter und Hüllkurvendetektor	503
12.2.5 Einseitenband-Amplitudenmodulation (EM) (R.W. Lorenz)	506
12.2.5.1 EM-Modulatoren	507
12.2.5.2 EM-Demodulation	511
12.2.6 Amplitudentastung (O. Zinke, K.-H. Gerrath)	513
12.3 Winkelmodulation (Frequenz- oder Phasenmodulation) (O. Zinke)	514
12.3.1 Grundbegriffe der Winkelmodulation	515
12.3.1.1 Phasenhub und Frequenzhub bei Winkelmodulation	516
12.3.1.2 Pendelzeigerdiagramm bei Winkelmodulation und Frequenzspektrum	516
12.3.2 Frequenzumtastung (FSK). Phasenumtastung (PSK)	517
12.3.2.1 Pendelzeigerdiagramme bei Umtastung	517
12.3.2.2 Frequenzspektrum und Bandbreite bei Frequenzumtastung (FSK)	519
12.3.2.3 Frequenzspektrum und Bandbreite bei Phasenumtastung (PSK)	524
12.3.3 Harmonische Winkelmodulation	526
12.3.3.1 Pendelzeigerdiagramm. Frequenz- und Phasenhub	526
12.3.3.2 Frequenzspektrum und Bandbreite bei harmonischer Winkelmodulation	527
12.3.3.3 Unsymmetrisches Spektrum bei Winkelmodulation	530

12.3.3.4 Unterschied zwischen Frequenzmodulation und Phasenmodulation	530
12.3.4 Unterdrückung von Störungen bei großem Modulationsindex	531
12.3.5 Modulationsverfahren für Frequenzmodulation (FM)	533
12.3.6 Modulationsverfahren für Phasenmodulation (PM)	535
12.3.7 Demodulationsverfahren für winkelmodulierte Schwingungen	537
12.3.8 Anwendung mehrerer Modulationsarten (Stereo-Rundfunk-Norm) ..	540
12.3.9 Quadraturmodulation (QAM) (A. Vlcek)	541
12.4 Pulsmodulation (H. Brunswig; O. Zinke)	545
12.4.1 Pulsmodulationsverfahren	546
12.4.2 Pulsdemodulationsverfahren	550
12.4.3 Zeitmultiplexverfahren	551
12.5 Frequenzspreizung (K.-H. Gerrath)	553
12.5.1 Bandbreite und Störabstand	553
12.5.2 Code-Spreizverfahren	554
12.5.3 Spreizcodes	555
12.5.4 Codemultiplex	557
12.6 Verhalten von amplitudenmodulierten und winkelmodulierten Systemen bei Rauschstörungen (A. Vlcek)	558
12.6.1 Mathematische Beschreibung von Bandpaßrauschen	558
12.6.2 Rauschen in amplitudenmodulierten Systemen	559
12.6.2.1 Rauschen beim Hüllendetektor	560
12.6.2.2 Rauschen beim Synchrodetektor	561
12.6.2.3 Vergleich der verschiedenen Amplitudenmodulationsverfahren	561
12.6.3 Rauschen in winkelmodulierten Systemen	562
12.7 Geräusch in pulsmodulierten Systemen (A. Vlcek)	566
12.7.1 Wertkontinuierliche Pulsmodulationen	566
12.7.2 Wertdiskrete Modulationen	567
12.7.2.1 Detektion von binären Impulsen	567
12.7.2.2 Quantisierungsgeräusch	569
12.8 Literatur	571
Anhang	574
A. Integraltransformationen (A. Vlcek)	574
A.1 Die Impulsfunktion $\delta(x)$	574
A.2 Die Fourier-Transformation	575
A.3 Lineare Systeme	578
A.4 Die Hilbert-Transformation	579
B. Die Radargleichung für Primärradar (A. Vlcek)	580
Literatur zu Anhang A	581
Sachverzeichnis	583