

Springer

Berlin

Heidelberg

New York

Barcelona

Budapest

Hong Kong

London

Mailand

Paris

Tokyo

O. Zinke · H. Brunswig

Hochfrequenztechnik 1

Hochfrequenzfilter, Leitungen, Antennen

5., neubearbeitete Auflage

Herausgegeben von Anton Vlcek und Hans Ludwig Hartnagel

Mit 410 Abbildungen



Springer

Dr.-Ing. Anton Vlcek
Professor, Technische Hochschule Darmstadt

Dr. Eng. Dr. h. c. Hans Ludwig Hartnagel
Professor, Technische Hochschule Darmstadt

Die ersten vier Auflagen erschienen (als Monographien) unter dem Titel
„Zinke/Brunswig: Lehrbuch der Hochfrequenztechnik“.

ISBN 978-3-662-00813-3 ISBN 978-3-662-00812-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-00812-6

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Hochfrequenztechnik / Zinke/Brunswig. – Berlin ; Heidelberg ;
New York ; London ; Paris ; Tokyo ; Hong Kong ; Barcelona ;
Budapest : Springer
(Springer-Lehrbuch)

Früher u. d. T.: Lehrbuch der Hochfrequenztechnik

NE: Zinke, Otto [Hrsg.]

I. Hochfrequenzfilter, Leitungen, Antennen / hrsg. von Anton
Vlcek und Hans Ludwig Hartnagel. – 5., neubearb. Aufl. –
1995

ISBN 978-3-662-00813-3

NE: Vlcek, Anton [Hrsg.]

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1965 and 1995

Softcover reprint of the hardcover 5th edition 1995

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk be- rechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Rich- tigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Macmillan India Ltd, Bangalore, Indien

Produktion: PRODUserV Springer Produktions-Gesellschaft, Berlin

SPIN: 10128143

60/3020 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort zur fünften Auflage

Im Januar 1990 erschien die vierte Auflage des Lehrbuchs der Hochfrequenztechnik, Band 1, fast genau vier Jahre nach dem Erscheinen der dritten. Mit der Vorlage der nunmehr fünften Auflage dieses Bandes wird der von der Erstauflage an beobachtete Neuerscheinungsrhythmus praktisch fortgesetzt, was für ein ebenfalls praktisch unverändert großes Interesse der in Frage kommenden Leserschaft am dargebotenen Stoff spricht.

Gegenüber der vierten Auflage erscheint die neue fünfte in einer neuen Aufmachung und auch der Text wurde komplett mit Hilfe eines Textverarbeitungssystems neu gesetzt. Dem Verlag ist für die Sorgfalt zu danken mit der dabei vorgegangen wurde, und allen Ko-Autoren dafür, daß sie durch aufmerksames Korrekturlesen die Gefahr des Einschleichens von neuen Druckfehlern auf ein Minimum gebracht haben.

Ein ganz besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. R.W. Lorenz, der es übernommen hat, die Einleitung zum ersten Band zu überarbeiten und zu aktualisieren, sowie Herrn Dr.-Ing. R. Dill für die Überarbeitung und Erweiterung des Kapitels über akustische Oberflächenwellenfilter und Herrn Dr.-Ing. A. Czyłwik für seine Beiträge zum Kapitel über Lichtwellenleiter.

Herr Professor Zinke hat sich bei dieser Auflage ganz aus der Herausgeberschaft zurückgezogen. Der Unterzeichner hat deswegen Herrn Professor Hartnagel gebeten, die Mitherausgeberschaft zu übernehmen.

Darmstadt, im Februar 1995

Anton Vlcek

Mitarbeiterverzeichnis

- Albert, Gerhard**, Dr.-Ing., Professor, Fachhochschule Mannheim
- Arndt, Fritz**, Dr.-Ing., Professor, Universität Bremen
- Bottenberg, Hans**, Dr.-Ing., Dozent, Freie Universität Brüssel
- Briechle, Roland**, Dr.-Ing., AMC, Ulm
- Brunswig, Heinrich**, Dr.-Ing., Professor, Technische Hochschule Darmstadt
- Czylwik, Andreas**, Dr.-Ing., Darmstadt
- Dill, Roland**, Dr.-Ing., Siemens AG, München
- Dittmer, Gonde**, Dr.-Ing., Professor, Fachhochschule Kiel
- Heß, Hartmut**, Dr.-Ing., Felsbergstr. 3, 64367 Mühlthal
- Lorenz, Rudolf W.**, Dr.-Ing., Forschungsinstitut der Deutschen Bundespost,
Darmstadt
- Mayer, Konrad**, Dr.-Ing., Akadem. Oberrat, Technische Hochschule Darmstadt
- Motz, Tilman**, Dr.-Ing., Akadem. Oberrat, Technische Hochschule Darmstadt
- Rembold, Bernd**, Dr.-Ing., Daimler-Benz Aerospace AG, Ulm
- Stocker, Helmut**, Dr. techn., Siemens AG, München
- Vleck, Anton**, Dr.-Ing., Professor, Technische Hochschule Darmstadt
- Vöge, Karl Hinrich**, Dr.-Ing., Deutsche Telepost Consulting GmbH, Berlin
- Vollhardt, Hermann**, Dipl.-Ing., Siemens AG, München
- Zinke, Otto**, Dr.-Ing., habil., Dr.-Ing., E.h., Professor, Technische Hochschule
Darmstadt
- Zwick, Ulrich**, Dr.-Ing., Lindental 28a, 70499 Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

0.	Einleitung zum ersten Band (O. Zinke; R.W. Lorenz)	1
0.1	Literatur	8
1.	Schwingkreise, Zweipole, Koppelfilter aus konzentriert und passiv wirkenden Bauelementen (H. Brunswig; G. Dittmer; R.W. Lorenz; A. Vlcek; K.H. Vöge; O. Zinke)	10
1.1	Zeigerdiagramme von Spulen und Kondensatoren mit Verlusten (O. Zinke)	10
1.2	Parallel- und Serienresonanzkreise	12
1.2.1	Verlustfrei angenommene Resonanzkreise (K.H. Vöge; O. Zinke)	12
1.2.2	Resonanzkreise mit einem Verlustwiderstand (K.H. Vöge; O. Zinke)	14
1.2.3	Resonanzkreise mit mehreren Verlustwiderständen (G. Dittmer; O. Zinke)	23
1.2.4	Mehrfachspeiseschaltung aus konzentrierten Elementen (H. Brunswig)	26
1.3	Kopplungsbandfilter in Übertragungssystemen (R.W. Lorenz)	27
1.3.1	Zweikreisige Kopplungsbandfilter	28
1.3.1.1	Analytische Berechnung zweikreisiger Kopplungsfilter	28
1.3.1.2	Dimensionierung zweikreisiger Kopplungsfilter	32
1.3.2	Anpassungsschaltungen	34
1.3.3	Mehrkreisige Kopplungsbandfilter	36
1.3.3.1	Der normierte Tiefpaß	37
1.3.3.2	Entnormierung	39
1.3.3.3	Tiefpaß-Bandpaßtransformation	40
1.3.3.4	Negativgyrator und Entwicklung der Kopplungsbandfilter	41
1.3.4	Verluste in Reaktanzfiltern	44
1.3.5	Anwendungsbereich aktiver Filterschaltungen	44
1.4	Energieerhaltungssatz, Impedanz, Admittanz und Güte-Definitionen (A. Vlcek)	45
1.4.1	Der Energieerhaltungssatz der Netzwerktheorie	45
1.4.2	Impedanz und Admittanz	45
1.4.3	Definition der Güte aus dem Phasenwinkel	46
1.4.4	Definition der Güte mit Hilfe der gesamten gespeicherten Energie	47
1.4.5	Definition der Güte aus der Phasensteilheit	47
1.4.6	Definition der Güte aus der Bandbreite bei Resonanz	48
1.5	Literatur	49

2.	Ausbreitung von Lecher-Wellen auf Leitungen und Kabeln	
	(A. Vlcek; O. Zinke)	51
2.1	Ableitung der Leitungsgleichungen (O. Zinke)	52
2.1.1	Differentialgleichungen für Strom und Spannung in Abhängigkeit von Ort und Zeit	52
2.1.2	Lösung der Differentialgleichung für rein sinusförmige Vorgänge	54
2.1.3	Exakte Darstellung der Dämpfungs- und Phasenkonstante. Phasengeschwindigkeit	57
2.1.4	Leitungswellenwiderstand. Frequenzabhängigkeit von R' , G' , L' und Z_L	59
2.1.5	Strom- und Spannungsverteilung auf der Leitung	64
2.1.6	Eingangswiderstand und Reflexionsfaktor. Welligkeits- und Anpassungsfaktor	67
2.2	Verlustlos angenommene Leitungsabchnitte. Strom- und Spannungsverteilung. „Leitungsdiagramme“. Reflexionsfaktor	69
2.2.1	Strom- und Spannungsverteilung (O. Zinke)	69
2.2.2	Eingangswiderstand und Reflexionsfaktor (O. Zinke)	70
2.2.3	Leitungsdiagramme (A. Vlcek)	72
2.2.3.1	Das Leitungsdiagramm erster Art (Buschbeck-Diagramm)	72
2.2.3.2	Das Leitungsdiagramm zweiter Art (Smith-Diagramm)	74
2.2.4	Anwendungsbeispiele für Leitungsdiagramme (A. Vlcek)	76
2.3	Offene bzw. kurzgeschlossene Leitungen mit Berücksichtigung der Dämpfung	82
2.3.1	Strom- und Spannungsverteilung offener und kurzgeschlossener Leitungen (O. Zinke)	83
2.3.2	Eingangswiderstand offener und kurzgeschlossener Leitungen (O. Zinke)	84
2.3.3	Leitungsresonatoren, $\lambda/4$ -Leitungen als Resonatoren (O. Zinke)	86
2.3.4	Bestimmung des Hochfrequenzwiderstandes von Leitern (O. Zinke)	89
2.3.5	Bauformen von Leitungsresonatoren (A. Vlcek)	93
2.4	Reflexionsfaktor, transportierte Wirkleistung und Anpassungen verlustbehafteter Leitungen (Reflexionsanpassung, Leistungsanpassung) (A. Vlcek)	99
2.4.1	Reflexionsfaktor	99
2.4.2	Transportierte Leistung, Reflexionsanpassung, Leistungsanpassung	101
2.5	Literatur	102
3.	Hochfrequenztransformatoren und Symmetrierglieder	
	(K. Mayer; R.W. Lorenz; O. Zinke)	103
3.1	Hochfrequenztransformatoren. Übersicht (O. Zinke)	103
3.1.1	Wicklungstransformatoren (O. Zinke)	104
3.1.2	Resonanztransformatoren aus konzentrierten Elementen (R.W. Lorenz)	105

- 3.1.3 Leitungstransformatoren aus homogenen verlustarmen Leitungen (K. Mayer) 107
 - 3.1.3.1 Einstufige Transformatoren mit $\lambda/4$ -Leitung 107
 - 3.1.3.2 Mehrstufige Transformatoren mit $\lambda/4$ -Leitungen 109
 - 3.1.3.3 Kompensierte $\lambda/4$ -Transformatoren 116
- 3.1.4 Transformation mit inhomogenen verlustarmen Leitungen 119
 - 3.1.4.1 Mathematische Beschreibung der inhomogenen Leitung (O. Zinke) 119
 - 3.1.4.2 Exponentialleitung und Tschebyscheff-Leitung als Beispiel von inhomogenen Leitungen (K. Mayer) 121
 - 3.1.4.3 Kompensierte inhomogene Leitungen (K. Mayer) 124
 - 3.1.4.4 Cosinus-Quadrat-Leitung und Radialleitung (O. Zinke) 126
- 3.1.5 Transformatoren in Streifenleitungstechnik (K. Mayer) 127
 - 3.1.5.1 $\lambda/4$ -Transformatoren in Streifenleitungstechnik 128
 - 3.1.5.2 Inhomogene Leitungen in Streifenleitungstechnik 128
- 3.2 Übergang zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Leitungen (O. Zinke) 130
 - 3.2.1 Symmetrierübertrager mit Wicklungen 133
 - 3.2.2 Symmetrierübertrager aus Leitungselementen 134
 - 3.2.2.1 Sperrtöpfe 134
 - 3.2.2.2 Symmetriertöpfe und Symmetrierschleifen 135
 - 3.2.2.3 Schlitzübertrager 137
 - 3.2.2.4 $\lambda/2$ -Umwegleitung 141
- 3.3 Breitbandige Leitungsübertrager zur Transformation und Symmetrierung aus Leitungen und Ferritbauelementen (K. Mayer) 142
- 3.4 Literatur 144
- 4. Eigenschaften und Dimensionierung von Koaxialkabeln, Streifenleitungen, Finleitungen, Richtkopplern und Hochfrequenzfilter (F. Arndt; R. Briechle; R. Dill; T. Motz; B. Rembold; H. Stocker; H. Vollhardt; O. Zinke) 146**
 - 4.1 Begriff des Feldwellenwiderstandes (O. Zinke) 146
 - 4.2 Leitungswellenwiderstand und Kapazitätsbelag (O. Zinke) 147
 - 4.3 Leitungswellenwiderstand und Induktivitätsbelag (O. Zinke) 147
 - 4.4 Übertragene Leistung und Leistungsdichte (O. Zinke) 148
 - 4.5 Spannungsbeanspruchung, Leitungsdämpfung und Wärmebegrenzung bei Leistungskabeln (O. Zinke) 148
 - 4.6 Optimale Koaxialkabel (O. Zinke) 151
 - 4.6.1 Wellenwiderstand des Koaxialkabels 151
 - 4.6.2 Kabel minimaler Dämpfung 152
 - 4.6.3 Kabel größter Spannungsfestigkeit 153
 - 4.6.4 Kabel bester Leistungsübertragung 154
 - 4.7 Streifenleitungen (R. Briechle) 156
 - 4.7.1 Überblick über verschiedene Bauarten und Anwendungen 156
 - 4.7.2 Feldtypen bei Streifenleitungen 158
 - 4.7.3 Quasistatische Leitungskonstanten 160
 - 4.7.4 Geschirmte Streifenleitung (Stripline, Triplateline) 160

4.8	Mikrostreifenleitung (Microstrip) (R. Briechle)	164
4.8.1	Quasistatische Leitungskonstanten der Mikrostreifenleitung	164
4.8.2	Dispersion der Mikrostreifenleitung	166
4.8.3	Dämpfung der Mikrostreifenleitung	168
4.9	Koplanare Leitungen (R. Briechle; B. Rembold)	169
4.9.1	Quasistatische Leitungskonstanten der Koplanarleitung (R. Briechle)	169
4.9.2	Dispersion der Koplanarleitung (R. Briechle)	171
4.9.3	Dämpfung der Koplanarleitung (R. Briechle)	171
4.9.4	Koplanare Zweibandleitung (R. Briechle)	173
4.9.5	Offene Schlitzleitung (Slotline) (B. Rembold)	176
4.10	Geschirmte Schlitzleitungen (Finleitungen) (B. Rembold)	178
4.10.1	Leitungseigenschaften	178
4.10.2	Anwendung von Finleitungen	180
4.10.2.1	PIN-Dioden-Dämpfungsglied	180
4.10.2.2	Gegentaktmischer	181
4.10.2.3	Bandpaßfilter	182
4.11	Streumatrix und Wellenkettmatrix (F. Arndt)	182
4.11.1	Definition der Streumatrix	182
4.11.2	Bedeutung der Streumatrixkoeffizienten; Reflexionskoeffizient, Transmissionskoeffizient	184
4.11.3	Definition der zu- und ablaufenden Wellen aus der Wirkleistung	187
4.11.4	Berechnung der Streumatrix aus der Y -Matrix und der Z -Matrix	188
4.11.5	Streumatrix bei verlustfreien Mehrtoren mit reellen Abschlußwiderständen, Unitaritätsrelation	190
4.11.6	Wellenkettmatrix	191
4.12	Streumatrix von angepaßten Leistungsteilern (F. Arndt)	192
4.12.1	Ringkoppler (180°- und 90°-Hybrid)	192
4.12.2	Angepaßtes Dreitor (Wilkinson-Teiler)	193
4.13	Mehrleitersysteme, Richtkoppler (F. Arndt)	194
4.13.1	Gekoppelte TEM-Wellenleitungen	194
4.13.1.1	Leitungsdifferentialgleichungen	194
4.13.1.2	Gleich- und Gegentakterregung	196
4.13.1.3	Kettmatrix	197
4.13.1.4	Streumatrix beim Abschluß mit dem Leitungswellen- widerstand	200
4.13.2	TEM-Wellen-Richtkoppler	202
4.13.2.1	Definitionen und Veranschaulichung der Richtwirkung	202
4.13.2.2	Ortsabhängige Kopplung	204
4.13.3	Modifizierte Koppelabschnitte zur Erzielung hoher Kopplung	208
4.13.3.1	Tandemkoppler	208
4.13.3.2	Interdigitalkoppler (Lange-Koppler) und Streifen-Schlitz-Koppler (DeRonde-Koppler)	210
4.13.4	Modifizierte Koppelabschnitte zur Erhöhung der Richtwirkung bei Mikrostreifenleitungskopplern	212
4.13.5	Richtkoppler für Millimeterwellen	213
4.13.6	Filter und Phasenschieber aus gekoppelten Wellenleitungen	214

4.14	Mikrowellenfilter mit Leitungen (H. Vollhardt)	216
4.14.1	Richards-Transformation	216
4.14.2	Bandsperr mit Leitungsresonatoren, Schaltungsumwandlungen	217
4.14.3	Bandpaß mit parallelgekoppelten $\lambda_0/2$ -Resonatoren	220
4.14.4	Interdigital- und Kammlitungs-Bandpässe	221
4.15	Akustische Oberflächenwellenfilter (H. Stocker; R. Dill)	224
4.15.1	Einführung	225
4.15.2	Interdigitalwandler	227
4.15.2.1	δ -Funktionen-Modell	227
4.15.2.2	Ersatzschaltungsmodell	228
4.15.2.3	Ausführungsformen	230
4.15.3	Filter vom Interdigitalwandlertyp	231
4.15.3.1	Übertragungseigenschaften	231
4.15.3.2	Entwurf	231
4.15.3.3	Herstellungsbereiche	231
4.15.4	Oberflächenwellenfilter mit niedriger Einfügungsdämpfung	233
4.15.4.1	Techniken zur Verringerung der Einfügungsdämpfung	233
4.15.4.2	Einsatz in Mobilfunkgeräten	234
4.15.5	Weitere akustische Oberflächenwellenfilter	236
4.16	Quarzfilter (T. Motz)	236
4.16.1	Einleitung	236
4.16.2	Der Quarz als frequenzselektives Bauelement	238
4.16.3	Betriebseigenschaften von Quarzfiltern	239
4.16.4	Quarzfilter in Abzweigschaltung	240
4.16.5	Quarzfilter in Brückenschaltung	242
4.16.6	Monolithische Quarzfilter	245
4.16.7	Quarzfilter mit einstellbarer Bandbreite	247
4.16.8	Zur Synthese von Quarzfiltern	249
4.17	Literatur	250
5.	Feldmäßige Darstellung der Ausbreitung längs Wellenleitern (F. Arndt; A. Czylik; R.W. Lorenz; B. Rembold; A. Vlcek; H. Vollhardt; O. Zinke; U. Zwick)	259
5.1	Maxwellsche Feldgleichungen (A. Vlcek)	259
5.1.1	Wellengleichungen für E and H , die elektrodynamischen Potentiale A und φ	262
5.1.2	Maxwellsche Feldgleichungen in Komponentendarstellung	263
5.1.2.1	Spezialisierung auf den Fall harmonischer Vorgänge	264
5.1.3	Feldwellengleichungen für die axialen Komponenten E_z und H_z und die Gleichungen für die restlichen Feldkomponenten	265
5.1.4	Grenzbedingungen für die elektrischen und magnetischen Feldgrößen	266
5.1.5	Poyntingscher Vektor und Poyntingscher Satz	267
5.2	Beziehungen zwischen Feldtheorie und Leitungstheorie. Kritik der Leitungsgleichungen für Leitungen vom Lecher-Typ	269
5.2.1	TEM-Wellen (R.W. Lorenz)	269
5.2.2	Berücksichtigung der Leiterverluste (R.W. Lorenz)	272

5.2.3	Gegenüberstellung der Lecher-, Leitungs- und TEM-Wellen (R.W. Lorenz)	276
5.3	Ebene Wellen im unbegrenzten, bereichsweise homogenen Medium (A. Vlcek)	278
5.3.1	Homogene ebene Welle, TEM-Welle	278
5.3.2	TE-Wellen (H-Wellen) und TM-Wellen (E-Wellen)	283
5.3.3	Reflexions- und Brechungsgesetze	284
5.4	Dielektrische Wellenleiter (A. Vlcek)	290
5.4.1	Dielektrische Plattenleiter	290
5.4.2	Kreiszyklindrische, dielektrische Wellenleiter	298
5.4.3	Lichtwellenleiter (A. Czylik; U. Zwick)	303
5.4.3.1	Aufbau von Lichtwellenleitern und ihr Brechzahlprofil	303
5.4.3.2	Strahlenoptik und Wellenoptik	304
5.4.3.3	Strahlenoptische Beschreibung von Multimode-Lichtwellenleitern	304
5.4.3.4	Wellenoptische Beschreibung von Lichtwellenleitern	312
5.4.3.5	Dämpfung	316
5.4.3.6	Dispersion	318
5.4.3.7	Optische Übertragungssysteme	321
5.4.3.7.1	Optische Sender	321
5.4.3.7.2	Optische Empfänger	322
5.4.3.7.3	Systeme und Modulationsverfahren	323
5.5	Oberflächenwellenleiter (A. Vlcek)	325
5.5.1	Dielektrisch beschichtete Metallplatte	325
5.5.2	Dielektrisch beschichteter Metalldraht	326
5.6	Metallische Wellenleiter für höhere Feldtypen (A. Vlcek)	327
5.6.1	Die Zweiplattenleitung	327
5.6.2	Der Rechteckhohlleiter	329
5.6.3	Der Rundhohlleiter	332
5.6.4	Verallgemeinerte Leitungsgleichungen. Hohlleitersatzbilder und Wirkdämpfung der Hohlleiterwellen	335
5.6.5	Koaxialleitung mit höheren Feldtypen	346
5.7	Bauelemente der Hohlleitertechnik (A. Vlcek)	347
5.7.1	Verzweigungsschaltungen für Rechteckhohlleiter	348
5.7.2	Metallische Blenden und Stifte in Hohlleitern	351
5.7.3	Hohlleiter mit inhomogenem dielektrischem Stoffeinsatz	352
5.7.4	Hohlraumresonatoren	354
5.7.5	Filter mit Hohlleiter- und dielektrischen Resonatoren (H. Vollhardt)	357
5.7.5.1	Rechteckhohlleiter-Bandpaß	357
5.7.5.2	Doppelausnutzung von Hohlleiter-Resonatoren	359
5.7.5.3	Filter mit dielektrischen Resonatoren	361
5.7.6	Hohlleiterringkoppler (F. Arndt)	364
5.7.6.1	Aperturkoppler	364
5.7.6.2	Breitschlitzkoppler	365
5.7.6.3	Weitere Hohlleiterringkoppler	366
5.8	Wellenausbreitung in gyromagnetischen Medien (richtungsabhängige Bauelemente, Ferrite und Granate) (B. Rembold)	366
5.8.1	Grundlagen	366

5.8.1.1	Die richtungsabhängige Permeabilität $\ \mu\ $	367
5.8.1.2	Wellenausbreitung in vormagnetisierten Ferriten	369
5.8.2	Anwendung bei nichtreziproken Bauelementen	372
5.8.2.1	Zirkulatoren (Richtungsgabeln)	372
5.8.2.2	Einwegleitungen (Richtungsleitungen)	375
5.9	Wellenausbreitung in einem Plasma mit magnetischem Gleichfeld (gyromagnetische Eigenschaften der Ionosphäre) (B. Rembold)	377
5.9.1	Grundlagen	377
5.9.2	Wellenausbreitung	378
5.10	Literatur	380
6.	Elektromagnetische Strahlung und Antennen (G. Albert; H. Bottenberg; H. Brunswig; H. Heß; R.W. Lorenz; A. Vlcek; O. Zinke)	384
6.1	Grundbegriffe der Strahlung	384
6.1.1	Feldgleichungen und Strahlungscharakteristik des Hertzischen Dipols (O. Zinke)	384
6.1.2	Der Rahmen als gespeister magnetischer Dipol (O. Zinke)	391
6.1.3	Hertzscher Dipol und Rahmenantenne als Empfangsantennen (H. Brunswig)	392
6.1.4	Polarisation, Poincaré-Kugel (H. Brunswig; A. Vlcek)	393
6.1.5	Strahlungsdichte, Strahlungsleistung, Strahlungswiderstände (O. Zinke)	396
6.1.6	Antennensysteme. Multiplikatives Gesetz (O. Zinke)	398
6.1.7	Richtfaktor. Äquivalenter Raumwinkel. Gewinn. Wirkfläche. Grundübertragungsgleichung (R.W. Lorenz; A. Vlcek)	400
6.1.8	Grundgesetze der Strahlungskopplung (O. Zinke)	405
6.1.9	Umkehrsatz (Reziprozitätssatz) für Sende- und Empfangsantennen (O. Zinke)	406
6.1.10	Reziprozitätstheorem der Elektrodynamik (A. Vlcek)	407
6.2	Antennen mit einer größten Ausdehnung von etwa einer Wellenlänge	408
6.2.1	Fernfeldstärke einer beliebig langen Vertikalantenne über Erde (O. Zinke)	408
6.2.2	Elektrisch kurze Antennen ($l \leq \lambda/8$) über Erde (Mittel- und Langwellenantennen) (H. Brunswig; O. Zinke)	410
6.2.2.1	Feldstärke und Strahlungswiderstand	410
6.2.2.2	Erdwiderstände. Antennenwirkungsgrad	411
6.2.2.3	Effektive Höhe elektrisch kurzer Antennen	412
6.2.2.4	Anpassung elektrisch kurzer Antennen. X_{κ} -Schaltung	412
6.2.2.5	Verlängerung elektrisch kurzer Antennen	413
6.2.3	$\lambda/4$ - und $\lambda/2$ -Antenne über Erde (O. Zinke)	414
6.2.4	Schwundmindernde Antennen ($l \geq \lambda/2$) über Erde (H. Brunswig)	416
6.2.5	Symmetrischer Dipol im freien Raum (O. Zinke)	419
6.2.6	Rahmenantennen. Ringantennen (H. Brunswig)	420
6.2.7	Spiegelung vertikaler und horizontaler Antennen an der Erde (O. Zinke)	423
6.2.8	Rundstrahlantennen mit horizontaler Polarisation (H. Brunswig)	424
6.2.9	Reflektoren. Directoren (H. Brunswig; O. Zinke)	425
6.2.10	Übergewinnantennen (Supergain Antennas) (G. Albert)	427

6.2.11	Babinets Prinzip. Komplementäre Antennen (H. Bottenberg)	432
6.2.12	Schlitzantennen (H. Brunswig; O. Zinke)	434
6.3	Stark bündelnde Antennen mit Ausdehnungen groß zur Wellenlänge	435
6.3.1	Langdrahtantennen (H. Brunswig)	435
6.3.2	Rhombusantennen (H. Brunswig)	437
6.3.3	Richtantennen mit Dipolgruppen (H. Brunswig; O. Zinke)	438
6.3.4	Komplementäre und logarithmisch-periodische Strukturen als Breitbandantennen (H. Heß; O. Zinke)	443
6.3.5	Antennen mit elektrischer Diagrammschwenkung (Phased Arrays) (G. Albert)	447
6.3.6	Vertikal bündelnde, horizontal polarisierte Rundstrahler (H. Brunswig)	450
6.3.7	Kreisgruppenantennen (H. Brunswig)	451
6.3.8	Dielektrische Antennen als Längsstrahler (O. Zinke)	451
6.3.9	Wendelantennen als Längsstrahler mit Zirkularpolarisation (O. Zinke)	452
6.3.10	Planarantennen	453
6.4	Aperturstrahler bzw. Flächenstrahler (Hornstrahler, Spiegel und Doppelspiegel, Linsenantennen) (H. Heß)	455
6.4.1	Prinzipien der Aperturstrahler	455
6.4.1.1	Geometrische Optik und ihre Grenzen	455
6.4.1.2	Beugungstheorie	456
6.4.1.3	Zusammenhang zwischen Aperturbelegung und Fernfeldcharakteristik	458
6.4.2	Horn- und Trichterstrahler	461
6.4.3	Spiegelantennen (Parabolspiegel, Hornparabol, Muschelantenne, Radarantenne)	461
6.4.3.1	Parabolspiegel	461
6.4.3.2	Hornparabol und Muschelantenne	462
6.4.3.3	Radarantennen	463
6.4.4	Doppelspiegelsysteme (Cassegrain- und Gregory-Systeme)	463
6.4.5	Erreger für Spiegelantennen	465
6.4.6	Linsenantennen	466
6.4.6.1	Verzögerungslinsen	466
6.4.6.2	Luneberg-Linse	466
6.4.6.3	Beschleunigungslinsen	466
6.4.7	Umlenkantennen und Radarziele	467
6.4.8	Antennen für Radioteleskope und Interferometer	469
6.5	Literatur	470
Anhang (A. Vlcek)		474
A.	Einführung in einige Begriffe der Vektorrechnung	474
A.1	Der Feldbegriff	474
A.2	Der Gradient	474
A.3	Die Divergenz	478
A.4	Die Rotation	480
A.5	Der Gaußsche und der Stokessche Integralsatz	483
A.6	Zweite Ableitungen	484
Sachverzeichnis		486

**Inhalt des zweiten Bandes:
Elektronik und Signalverarbeitung**

7. Halbleiter und Elektronenröhren
8. Störungen und Rauschen
9. Verstärker
10. Oszillatoren
11. Mischung (Frequenz-Umsetzung und -Vervielfachung)
12. Modulation, Tastung, Demodulation