

# Inhaltsverzeichnis

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

VII

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Elektromagnetische Wellen</b>	<b>7</b>
2.1	Maxwellsche Gleichungen für zeitharmonische Vorgänge . . . . .	7
2.1.1	Verschiedene Formen der Maxwellschen Gleichungen . . . . .	7
2.1.2	Durchflutungsgesetz . . . . .	9
2.1.3	Induktionsgesetz . . . . .	11
2.1.4	Quellenfreiheit der magnetischen Flussdichte . . . . .	11
2.1.5	Quellen des elektrischen Feldes . . . . .	12
2.2	Materialgleichungen und Randbedingungen . . . . .	12
2.2.1	Elektrisch polarisierbare Stoffe . . . . .	13
2.2.2	Magnetisch polarisierbare Stoffe . . . . .	14
2.2.3	Grenzflächen . . . . .	15
2.3	Skineffekt . . . . .	17
2.3.1	Leitfähigkeit und Wirbelströme . . . . .	17
2.3.2	Stromdichte in kreiszylindrischen Leitern . . . . .	18
2.3.3	Definition der Eindringtiefe . . . . .	21
2.3.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	23
2.4	Ebene Wellen . . . . .	24
2.4.1	Die Wellengleichung . . . . .	24
2.4.2	Eine einfache Lösung der Wellengleichung . . . . .	25
2.4.3	Polarisation . . . . .	33
2.5	Leitungsgeführte Wellen . . . . .	38
2.5.1	Transversal elektromagnetische Wellen . . . . .	38
2.5.2	Feldgrößen und Leitungsgrößen . . . . .	42
2.6	Übungsaufgaben . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Theorie der Leitungen</b>	<b>49</b>
3.1	Leitungsgleichungen . . . . .	49
3.1.1	Spannungs- und Stromverteilung . . . . .	49
3.1.2	Wellenwiderstand . . . . .	52
3.1.3	Reflexionsfaktor . . . . .	55
3.1.4	Leistungstransport . . . . .	56
3.1.5	Dämpfungskonstante bei kleinen Verlusten . . . . .	58

3.2	Leitungen mit beliebigem Abschluss . . . . .	58
3.2.1	Transformation des Reflexionsfaktors . . . . .	58
3.2.2	Stehwellenverhältnis und Anpassungsfaktor . . . . .	61
3.2.3	Blindleitungen . . . . .	64
3.3	Smith-Diagramm . . . . .	67
3.3.1	Grundlagen . . . . .	67
3.3.2	Konzentrierte Bauelemente . . . . .	71
3.3.3	Leitungsabschnitte . . . . .	73
3.3.4	Stichleitungen . . . . .	74
3.3.5	Impedanzmessung mit Hilfe einer Messleitung . . . . .	75
3.3.6	Zusammenfassung . . . . .	78
3.4	Wellengrößen und Streuparameter . . . . .	79
3.5	Übungsaufgaben . . . . .	84
<b>4</b>	<b>Bauelemente der Hochfrequenztechnik</b>	<b>87</b>
4.1	Leiter und Widerstände . . . . .	87
4.1.1	Skineffekt in kreiszylindrischen Leitern . . . . .	87
4.1.2	Widerstandsbaufornen . . . . .	89
4.1.3	Hochfrequenz-Ersatzschaltbilder . . . . .	90
4.2	Kondensatoren . . . . .	92
4.2.1	Grundlagen . . . . .	92
4.2.2	Geschichtete Dielektrika . . . . .	95
4.2.3	Beschreibung von Wirkverlusten . . . . .	96
4.2.4	Technische Ausführungsformen . . . . .	98
4.3	Induktivitäten . . . . .	100
4.3.1	Definition . . . . .	100
4.3.2	Leitender Kreisring . . . . .	100
4.3.3	Zylinderspule . . . . .	101
4.3.4	Gegeninduktivität . . . . .	102
4.3.5	Spulen mit magnetischem Kern . . . . .	107
4.3.6	Ringkern mit Luftspalt . . . . .	109
4.3.7	Magnetische Werkstoffe . . . . .	111
4.4	Übungsaufgaben . . . . .	115
<b>5</b>	<b>Passive lineare Schaltungen</b>	<b>121</b>
5.1	Transformationsschaltungen . . . . .	121
5.2	Resonanzschaltungen . . . . .	125
5.2.1	Resonanzkreis . . . . .	125
5.2.2	Schmalbandnäherung . . . . .	128
5.2.3	Güte von Reflexionsresonatoren . . . . .	129
5.2.4	Resonanztransformatoren . . . . .	131
5.2.5	Das Fostersche Theorem . . . . .	133
5.3	Breitbandschaltungen . . . . .	134

5.4	Filterschaltungen . . . . .	139
5.4.1	Grundlagen . . . . .	139
5.4.2	Zweikreisige Kopplungsbandfilter . . . . .	141
5.4.3	Akustische Oberflächenwellenfilter . . . . .	144
5.5	Übungsaufgaben . . . . .	145
<b>6</b>	<b>Elektromagnetische Wellen in homogenen Medien</b>	<b>149</b>
6.1	Beschreibung von Wirkverlusten im Medium . . . . .	149
6.1.1	Komplexe Materialparameter . . . . .	149
6.1.2	Näherung bei kleinen Verlusten . . . . .	150
6.1.3	Materialien mit endlicher Leitfähigkeit . . . . .	150
6.1.4	Mittlerer Leistungsfluss bei Verlusten . . . . .	151
6.2	Wechselwirkung mit dielektrischen Materialien . . . . .	152
6.2.1	Makroskopische Betrachtungsweise . . . . .	152
6.2.2	Mikroskopische Betrachtungsweise . . . . .	152
6.2.3	Debye-Beziehung . . . . .	155
6.3	Einflüsse elektromagnetischer Wellen auf biologische Gewebe . . . . .	157
6.3.1	Wirkungsweise . . . . .	157
6.3.2	Sicherheitsnormen zum Schutz des Menschen . . . . .	159
6.3.3	Bewertung . . . . .	161
6.4	Reflexion ebener Wellen an Grenzflächen . . . . .	164
6.4.1	Senkrechter Einfall . . . . .	164
6.4.2	Schräger Einfall . . . . .	165
6.4.3	Totalreflexion . . . . .	171
6.4.4	Reflexion an einer leitenden Ebene . . . . .	172
6.4.5	Rechteckhohlleiter . . . . .	174
6.4.6	Dielektrische Wellenleiter . . . . .	182
6.5	Übungsaufgaben . . . . .	184
<b>7</b>	<b>Antennen</b>	<b>187</b>
7.1	Grundbegriffe . . . . .	187
7.2	Isotroper Kugelstrahler . . . . .	189
7.3	Antennenkenngößen . . . . .	190
7.3.1	Gewinn . . . . .	190
7.3.2	Richtfaktor . . . . .	190
7.3.3	Wirkfläche . . . . .	191
7.3.4	Effektive Länge . . . . .	192
7.3.5	Richtcharakteristik . . . . .	193
7.4	Lineare Antennen . . . . .	194
7.4.1	Hertzscher Dipol . . . . .	195
7.4.2	Halbwellenstrahler . . . . .	198
7.4.3	Elektrisch kurze Antennen . . . . .	204
7.5	Antennenanordnungen . . . . .	205
7.5.1	Anordnungen von zwei Strahlern . . . . .	206

7.5.2	Dipolzeilen . . . . .	208
7.5.3	Multiplikatives Gesetz . . . . .	211
7.5.4	Spiegelungsprinzip . . . . .	211
7.5.5	Technische Ausführungsformen . . . . .	213
7.6	Ultrabreitbandantennen . . . . .	221
7.7	Übungsaufgaben . . . . .	227
<b>8</b>	<b>Ausbreitung elektromagnetischer Wellen</b>	<b>229</b>
8.1	Funkfelder im freien Raum . . . . .	229
8.2	Brechung in der Atmosphäre . . . . .	230
8.3	Reflexion . . . . .	231
8.3.1	Erdboden . . . . .	231
8.3.2	Ionosphäre . . . . .	234
8.3.3	Ausbreitung durch Streuung . . . . .	236
8.4	Atmosphärische Dämpfung . . . . .	238
8.5	Beugungserscheinungen . . . . .	239
8.6	Übungsaufgaben . . . . .	243
<b>9</b>	<b>Sende- und Empfangstechnik</b>	<b>245</b>
9.1	Nichtlineare Kennlinien . . . . .	245
9.1.1	Bauelemente und Potenzreihenentwicklung . . . . .	245
9.1.2	Aussteuerung mit einer Frequenz . . . . .	247
9.1.3	Aussteuerung mit zwei Signalen unterschiedlicher Frequenz . . . . .	247
9.1.4	Aussteuerung mit zwei Signalen gleicher Frequenz . . . . .	250
9.2	Mischer . . . . .	251
9.2.1	Beschreibung . . . . .	251
9.2.2	Kenngößen . . . . .	253
9.2.3	Konversionsarten . . . . .	257
9.3	Schwingungserzeugung . . . . .	258
9.3.1	Entdämpfung eines Schwingkreises . . . . .	259
9.3.2	Rückkopplung eines Verstärkers . . . . .	260
9.3.3	Einfache Oszillatorschaltungen . . . . .	262
9.3.4	Spannungsgesteuerte Oszillatoren . . . . .	266
9.3.5	Quarzoszillatoren . . . . .	267
9.3.6	Frequenzvervielfachung . . . . .	268
9.3.7	Frequenzteilung . . . . .	269
9.3.8	Frequenzaufbereitung . . . . .	269
9.4	Hochfrequenzverstärker . . . . .	271
9.4.1	Vorverstärkung . . . . .	271
9.4.2	Leistungsverstärkung . . . . .	278
9.5	Aufbau von Sendern . . . . .	284
9.5.1	Endstufenmodulation . . . . .	284
9.5.2	Zwischenfrequenzmodulation . . . . .	285

9.6	Aufbau von Empfängern	285
9.6.1	Geradeempfänger	285
9.6.2	Überlagerungsempfänger	286
9.6.3	Direktkonversionsempfänger	288
9.7	Modulation und Demodulation	289
9.7.1	Amplitudenmodulation	289
9.7.2	Einseitenbandmodulation	292
9.7.3	Frequenzmodulation	293
9.7.4	Grundzüge digitaler Modulationsverfahren	296
9.8	Rauschen	304
9.8.1	Grundbegriffe des elektrischen Rauschens	304
9.8.2	Effektive Rauschtemperatur	307
9.8.3	Rauschzahl	308
9.8.4	Kettenrauschzahl	310
9.8.5	Rauschpegel	312
9.8.6	Rauschanpassung	312
9.8.7	Antennenrauschen	314
9.9	Übungsaufgaben	316

## **A Mathematische Grundlagen und Hilfsmittel 321**

A.1	Der Feldbegriff	321
A.2	Koordinatensysteme	322
A.2.1	Kartesische Koordinaten	322
A.2.2	Zylinderkoordinaten	323
A.2.3	Kugelkoordinaten	324
A.3	Vektoranalytische Operationen	325
A.3.1	Skalarprodukt	325
A.3.2	Kreuzprodukt	326
A.3.3	Der Gradient eines skalaren Feldes	326
A.3.4	Die Divergenz eines Vektorfeldes	327
A.3.5	Die Rotation eines Vektorfeldes	328
A.4	Kurven-, Flächen- und Volumenelemente	329
A.5	Kurven-, Flächen- und Volumenintegrale	333
A.6	Sätze und Korrespondenzen der Fouriertransformation	335

## **B Elektrotechnische Grundlagen und Hilfsmittel 337**

B.1	Komplexe Zeiger	337
B.2	Leistung im Netzwerk	338
B.3	Leistungstransport auf Hochfrequenzleitungen	343
B.4	Das Dezibel	344
B.4.1	Definition	345
B.4.2	Pegelrechnung	347
B.5	Grafische Auswertung der Richtcharakteristik	350

<b>C</b>	<b>Lösungen zu den Übungsaufgaben</b>	<b>355</b>
	<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>373</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>377</b>