

Inhalt

Einleitung	15
1.1 Hochfrequenzanwendungen	15
1.2 Frequenzbereiche	17
1.3 Hochfrequenztechnische Erscheinungen	18
1.3.1 Elektrisch kurze Leitungen	18
1.3.2 Leitungen mit einer Länge in der Größenordnung der Wellenlänge	20
1.3.3 Antennen und Abstrahlung elektromagnetischer Wellen	21
1.4 Ausblick auf die folgenden Kapitel	22
Elektromagnetische Felder und Wellen	24
2.1 Physikalische und mathematische Grundlagen	24
2.1.1 Elektrostatische Feldgrößen	24
2.1.1.1 Elektrische Feldstärke und Spannung	24
2.1.1.2 Polarisierung und relative Dielektrizitätszahl	28
2.1.1.3 Verhalten bei Wechselstrom	29
2.1.1.4 Dielektrische Verschiebungsdichte	30
2.1.1.5 Elektrische Feldenergie und Kapazität	30
2.1.2 Stationäre elektrische Strömungsfelder und magnetische Felder	31
2.1.2.1 Stromdichte, Leistungsdichte und Widerstand	31
2.1.2.2 Magnetische Feldstärke und magnetisches Vektorpotential	33
2.1.2.3 Magnetische Feldenergie und Induktivität	35
2.1.2.4 Lorentz-Kraft	35
2.1.3 Vektoranalytische Operatoren	36
2.1.3.1 Divergenz	36
2.1.3.2 Rotation	36
2.2 Maxwell'sche Gleichungen	37
2.2.1 Differentialform für allgemeine Zeitabhängigkeit	37
2.2.2 Differentialform für harmonische Zeitabhängigkeit	38
2.2.3 Integralform	39
2.2.4 Materialgleichungen	41
2.2.5 Verhalten an Materialgrenzen	43

2.3	Einteilung elektromagnetischer Feldprobleme	45
2.3.1	Statische Felder	45
2.3.2	Quasistatische Felder	45
2.3.3	Schnell veränderliche Felder	46
2.4	Skineffekt	46
2.5	Elektromagnetische Wellen	49
2.5.1	Wellengleichung und ebene Wellen	49
2.5.2	Polarisation	53
2.5.2.1	Lineare Polarisation	54
2.5.2.2	Zirkulare Polarisation	54
2.5.2.3	Elliptische Polarisation	54
2.5.3	Reflexion und Brechung an ebenen Grenzflächen	55
2.5.3.1	Senkrechter Einfall	56
2.5.3.2	Schräger Einfall	58
2.5.4	Kugelwellen	63
2.6	Zusammenfassung	64
2.7	Übungsaufgaben	65

3	Leitungstheorie und Signale auf Leitungen	67
3.1	Leitungstheorie	67
3.1.1	Ersatzschaltbild eines kurzen Leitungsstücks	67
3.1.2	Telegraphengleichung	69
3.1.3	Spannungs- und Stromwellen auf Leitungen	71
3.1.4	Einseitig abgeschlossene Leitung	74
3.1.5	Eingangsimpedanz einer abgeschlossenen Leitung	76
3.1.6	Verlustlose Leitungen	78
3.1.7	Leitungen mit geringen Verlusten	80
3.1.8	Verschiedene Leitungsabschlüsse einer verlustlosen Leitung	81
3.1.8.1	Angepasste Leitung	82
3.1.8.2	Kurzgeschlossene Leitung	83
3.1.8.3	Leerlaufende Leitung	85
3.1.8.4	Allgemeiner Abschluss	87
3.1.9	Verlustlose Leitungen als Impedanztransformatoren	88
3.1.9.1	Der $\lambda/4$ -Transformator	88
3.1.9.2	Der $\lambda/2$ -Transformator	88
3.1.10	Reflexionsfaktor einer verlustlosen Leitung	89
3.1.11	Smith-Chart-Diagramm	92
3.2	Zeitsignale auf Leitungen	97

3.2.1	Sprungförmige Signale	97
3.2.1.1	Angepasste Quelle und angepasster Abschluss	97
3.2.1.2	Angepasste Quelle und fehlangepasster (resistiver) Abschluss	99
3.2.1.3	Angepasste Quelle und fehlangepasster (reaktiver) Abschluss	101
3.2.1.4	Fehlanpassung an Quelle und Last	103
3.2.2	Rechteckförmige Signale	106
3.3	Augendiagramm	107
3.4	Zusammenfassung	110
3.5	Übungsaufgaben	111

4 Wellenleiter113

4.1	Überblick über technisch bedeutsame Leitungstypen	113
4.2	Koaxialleitungen	115
4.2.1	Induktivitätsbelag und Leitungswellenwiderstand	116
4.2.2	Dämpfung bei schwachen Verlusten.....	118
4.2.2.1	Metallische Verluste	119
4.2.2.2	Dielektrische Verluste	119
4.2.3	Nutzbarer Frequenzbereich	120
4.2.4	Anwendungsgebiete.....	122
4.3	Mikrostreifenleitungen (<i>Microstrip</i>)	122
4.3.1	Wellenwiderstand und effektive Permittivitätszahl	123
4.3.2	Dispersion und nutzbarer Frequenzbereich	126
4.3.3	Anwendungsgebiete.....	127
4.4	Streifenleitung (<i>Stripline</i>)	127
4.4.1	Leitungswellenwiderstand	128
4.4.2	Nutzbarer Frequenzbereich	128
4.4.3	Anwendungsgebiete.....	129
4.5	Rechteckhohlleiter	129
4.5.1	Allgemeine Überlegungen.....	130
4.5.2	Die H_{10} -Grundwelle.....	133
4.5.3	Höhere Wellentypen	136
4.5.4	Einsatzgebiete von Hohlleitern	137
4.5.5	Anregung von Hohlleiterwellen	138
4.5.6	Hohlraumresonatoren	139
4.6	Zweidrahtleitung	141
4.6.1	Leitungswellenwiderstand	142
4.6.2	Anwendungsgebiete.....	142
4.7	Dreileitersysteme	143

4.7.1	Gleich- und Gegentaktwellen	143
4.7.2	Leitungswellenwiderstände und Ausbreitungskonstanten	145
4.7.3	Leistungsabschluss	148
4.8	Übungsaufgaben	148
5	Streuparameter	150
5.1	Mehrtorgleichungen in Matrixform	150
5.2	Definition von Wellengrößen	151
5.3	Streuparameter und Leistung	153
5.4	Spezielle Eigenschaften von Schaltungen	156
5.4.1	Anpassung	156
5.4.2	Leistungsanpassung	157
5.4.3	Reziprozität (Übertragungssymmetrie)	158
5.4.4	Symmetrie	159
5.4.5	Verlustlosigkeit bei Passivität	159
5.4.6	Rückwirkungsfreiheit	160
5.4.7	Besondere Bedingungen bei Dreitoren	160
5.5	Berechnung von Streumatrizen	160
5.5.1	Reflexionsfaktoren	161
5.5.2	Transmissionsfaktoren	161
5.5.3	Umnormierung einer Streumatrix auf andere Torwiderstände	164
5.6	Signalflussmethode	165
5.7	Messung von Streuparametern	171
5.8	Übungsaufgaben	174
6	Hochfrequenzbauelemente und -schaltungen	177
6.1	Ersatzschaltbilder konzentrierter Bauelemente	177
6.1.1	Widerstände	177
6.1.2	Kondensatoren	179
6.1.3	Spulen	181
6.2	Leitungsresonatoren	182
6.2.1	$\lambda/2$ -Resonator	183
6.2.2	$\lambda/4$ -Resonator	184
6.3	Anpassschaltungen	186
6.3.1	LC-Anpassnetzwerke	187
6.3.2	Anpassung mit Leitungen	189
6.3.2.1	$\lambda/4$ -Transformator	189
6.3.2.2	Stichleitung und <i>Butterfly-Stubs</i>	191

6.4	Filter	193
6.4.1	Klassischer LC-Filterentwurf mit Induktivitäten und Kapazitäten	193
6.4.2	Entwurf von Butterworth-Filtern	195
6.4.2.1	Filter mit Tiefpassverhalten	195
6.4.2.2	Filter mit Hochpassverhalten	198
6.4.2.3	Filter mit Bandpassverhalten	200
6.5	Leitungsfiler	202
6.5.1	Seitengekoppelte Filter (<i>Edge-coupled-line-Filter</i>)	203
6.5.2	Seitengekoppelte Filter (<i>Hairpin-Filter</i>)	207
6.5.3	<i>Stepped-impedance</i> -Filter	208
6.5.4	Metallisch geschirmte Filter (Gehäuseresonanzen)	209
6.5.5	Hohlleitungsfiler	210
6.6	Zirkulatoren	211
6.7	Leistungsteiler	213
6.7.1	Wilkinson-Leistungsteiler	213
6.7.2	Leistungsteiler mit ungleicher Leistungsaufteilung	215
6.8	Branchline-Koppler	216
6.8.1	Konventioneller 3-dB-Koppler	216
6.8.2	Ungleiche Leistungsaufteilung und Impedanztransformation	219
6.9	<i>Rat-Race</i> -Koppler	221
6.10	Richtkoppler	222
6.11	Symmetrierglieder	224
6.12	Elektronische Schaltungen	226
6.12.1	Mischer	228
6.12.2	Verstärker und Oszillatoren	230
6.13	Moderne HF-Entwurfswerkzeuge	232
6.13.1	HF-Schaltungssimulatoren	232
6.13.2	Elektromagnetische 3D-Feldsimulation	232
6.14	Übungsaufgaben	236

7 Antennen 238

7.1	Grundbegriffe und Kenngrößen	238
7.1.1	Antennen als Wellentypwandler	238
7.1.2	Nahfeld und Fernfeld	239
7.1.3	Isotroper Kugelstrahler	240
7.1.4	Kenngrößen für das Strahlungsfeld einer Antenne	241
7.1.5	Anpassung und Bandbreite	246
7.2	Praktische Antennenbauformen	247

7.3	Mathematische Behandlung des Hertzschen Dipols	250
7.4	Drahtantennen	254
7.4.1	Halbwellendipol	255
7.4.2	Monopol	257
7.4.3	Verkürzung von Monopolantennen	258
7.5	Planare Antennen	259
7.5.1	Rechteckige <i>Patch</i> -Antenne	260
7.5.1.1	Abstrahlung eines <i>Patch</i> -Elementes	260
7.5.1.2	Resonanzfrequenz und <i>Patch</i> -Abmessungen	261
7.5.1.3	Speisung von <i>Patch</i> -Antennen	262
7.5.2	<i>Patch</i> -Antennen mit zirkularer Polarisierung	265
7.5.3	Planare Dipol- und <i>Inverted-F</i> -Antennen	267
7.6	Gruppenantennen	269
7.6.1	Einzelcharakteristik und Gruppenfaktor	269
7.6.2	Phasengesteuerte Antennen	273
7.6.3	Strahlformung	278
7.7	Weitere Antennenkonzepte	281
7.8	Übungsaufgaben	281

8 Funkwellen **283**

8.1	Wellenausbreitungseffekte	283
8.1.1	Reflexion und Brechung	283
8.1.2	Absorption	284
8.1.3	Beugung	284
8.1.4	Streuung	286
8.1.5	Doppler-Effekt	287
8.2	Einfache Ausbreitungsszenarien	290
8.2.1	Freiraumausbreitung	290
8.2.2	Dämpfung von Wellen in Luft	292
8.2.3	Ausbreitung über ebenem Grund (Zweiwegeausbreitung)	293
8.2.4	Richtfunkstrecken	296
8.2.5	Geschichtete Medien	298
8.3	Komplexe Umgebungen	300
8.3.1	Mehrwegeausbreitung	300
8.3.2	<i>Clutter Factor</i> -Modell	303
8.3.3	Okumura-Hata-Modell	304
8.3.4	Physikalische Modelle und numerische Feldberechnung	305
8.4	Übungsaufgaben	308

A	Anhang	309
A.1	Koordinatensysteme	309
A.1.1	Kartesisches Koordinatensystem	310
A.1.2	Zylinderkoordinatensystem	311
A.1.3	Kugelkoordinatensystem	312
A.2	Logarithmische Darstellung von technischen Größen	313
A.2.1	Dimensionslose Größen	313
A.2.2	Relative und absolute Pegel	314
A.2.3	Pegelplan einer Übertragungsstrecke.....	314
	Formelzeichen und Abkürzungen	316
	Literatur	319
	Index	323