

# Inhalt

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>15</b>
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
<b>2 Elektromagnetische Felder und Wellen.....</b>	<b>24</b>
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 Polarisation 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 Maxwellsche 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
<b>3</b>	<b>Leistungstheorie und Signale auf Leitungen .....</b>	<b>67</b>
3.1	Leistungstheorie .....	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	Anangepasste Quelle und angepasster Abschluss .....	97
3.2.1.2	Anangepasste Quelle und fehlangepasster (resistiver) Abschluss ....	99
3.2.1.3	Anangepasste 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
<b>4</b>	<b>Wellenleiter .....</b>	<b>113</b>
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	Dreileiterysteme .....	143

---

4.7.1 Gleich- und Gegentaktwellen .....	143
4.7.2 Leitungswellenwiderstände und Ausbreitungskonstanten .....	145
4.7.3 Leitungsabschluss .....	148
4.8 Übungsaufgaben .....	148
<b>5 Streuparameter .....</b>	<b>150</b>
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
<b>6 Hochfrequenzbauelemente und -schaltungen .....</b>	<b>177</b>
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-Stub</i> .....	191

---

6.4 Filter .....	193
6.4.1 Klassischer LC-Filterentwurf mit Induktivitäten und Kapazitäten .....	193
6.4.2 Entwurf von Butterworth-Filtren .....	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 Leitungsfilter .....	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 Hohlleitungsfilter .....	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
<b>7 Antennen .....</b>	<b>238</b>
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 Polarisation .....	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
<b>8</b>	<b>Funkwellen .....</b>	<b>283</b>
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-Model .....	304
8.3.4	Physikalische Modelle und numerische Feldberechnung .....	305
8.4	Übungsaufgaben .....	308

<b>A Anhang .....</b>	<b>309</b>
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
<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>316</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>319</b>
<b>Index .....</b>	<b>323</b>