

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	1
1.1 Frequenzbereiche .....	1
1.2 Elektromagnetische Grundgrößen .....	2
1.3 Antennen und Strahlungsfelder im Überblick .....	4
<b>2 Mathematische Grundlagen .....</b>	8
2.1 Vektoralgebra .....	8
2.1.1 Skalarprodukt .....	9
2.1.2 Vektorprodukt .....	10
2.1.3 Spatprodukt .....	11
2.2 Vektoranalysis .....	13
2.2.1 Differenziation von skalaren Feldern .....	13
2.2.2 Differenziation von Vektorfeldern .....	16
2.2.3 Rechnen mit dem Nabla-Operator .....	20
2.2.4 Integralsätze der Vektoranalysis .....	23
2.2.5 Helmholtzsches Theorem .....	26
2.3 Koordinatensysteme .....	27
2.4 Übungen .....	29
<b>3 Grundlagen der Elektrodynamik .....</b>	30
3.1 Energieerhaltungssatz .....	30
3.1.1 Darstellung im Zeitbereich .....	30
3.1.2 Darstellung im Frequenzbereich .....	32
3.2 Maxwellsche Gleichungen .....	33
3.2.1 Grundgleichungen .....	33
3.2.2 Einteilung der elektromagnetischen Felder .....	35
3.2.3 Prinzip von der Ladungserhaltung .....	35
3.2.4 Quellen der Vektorfelder .....	37
3.3 Wellengleichung .....	39
3.4 Helmholtz-Gleichung .....	40
3.5 Wellenausbreitung in anisotropen Medien .....	42
3.6 Rand- und Stetigkeitsbedingungen .....	43
3.7 Relativitätsprinzip .....	45
3.7.1 Lorentz-Transformation .....	46
3.7.2 Feld einer gleichförmig bewegten Ladung .....	51
3.8 Strahlung beschleunigter Elektronen .....	53
3.8.1 Strahlungsleistung .....	55
3.8.2 Linear beschleunigte Punktladung .....	56
3.8.3 Kreisförmig beschleunigte Punktladung .....	57
3.9 Übungen .....	58

<b>4 Ebene Wellen .....</b>	59
4.1 Ebene Wellen im Dielektrikum .....	59
4.1.1 Lösung der Helmholtz-Gleichung .....	59
4.1.2 Geschwindigkeitsdefinitionen .....	63
4.2 Ebene Wellen im Leiter .....	68
4.3 Ebene Wellen im Supraleiter .....	73
4.3.1 Londonsche Gleichungen .....	74
4.3.2 Telegrafen- und Helmholtz-Gleichung .....	75
4.4 Leistungstransport .....	79
4.5 Übungen .....	81
<b>5 Ausbreitungseffekte .....</b>	82
5.1 Polarisierung .....	82
5.2 Senkrechter Einfall auf eine ebene Trennfläche .....	86
5.2.1 Reflexions- und Durchlassfaktoren .....	87
5.2.2 Stehende Wellen .....	90
5.2.3 Leistungstransport .....	93
5.2.4 Strahlungsdruck .....	94
5.3 Radarreflexion an bewegten Objekten .....	95
5.3.1 Gleichförmig bewegter ebener Metallspiegel .....	95
5.3.2 Doppler-Effekt und Aberration .....	97
5.4 Schiefer Einfall auf eine ebene Trennfläche .....	100
5.4.1 Brechungsgesetz .....	100
5.4.2 Fresnelsche Formeln .....	104
5.4.3 Totaltransmission .....	108
5.4.4 Totalreflexion .....	114
5.5 Ebenes Drei- und Vierschichtenproblem .....	117
5.6 Beugung an einer metallischen Schirmkante .....	120
5.7 Übungen .....	122
<b>6 Wellenleiter .....</b>	123
6.1 Schwingungsformen in Hohlleitern .....	124
6.2 Rechteckhohlleiter .....	128
6.2.1 Eigenwellen .....	128
6.2.2 Hohlleiterschaltungen und Orthogonalentwicklung .....	137
6.3 Rundhohlleiter .....	142
6.3.1 Eigenwellen .....	142
6.3.2 Feldbilder .....	147
6.4 Besondere Hohlleitertypen .....	148
6.5 Hohlraumresonatoren .....	151
6.6 Koaxialleitung .....	152
6.6.1 Grundwelle .....	152
6.6.2 Höhere Wellentypen .....	154
6.7 Übungen .....	157

---

<b>7 Grundbegriffe der Antennentechnik .....</b>	158
7.1 Isotroper Strahler.....	158
7.2 Hertzscher Dipol als elektrischer Elementarstrahler.....	158
7.3 Kenngrößen von Antennen .....	160
7.3.1 Richtdiagramm.....	160
7.3.2 Richtfaktor und Gewinn .....	165
7.3.3 Äquivalenter Raumwinkel .....	167
7.3.4 Antennenwirkfläche .....	169
7.3.5 Polarisation .....	173
7.4 Übungen .....	175
<b>8 Grundbegriffe von Strahlungsfeldern .....</b>	176
8.1 Grundgleichungen .....	176
8.2 Potenziallösung der Feldgleichungen.....	178
8.2.1 Magnetisches Vektorpotenzial .....	179
8.2.2 Elektrisches Vektorpotenzial .....	185
8.2.3 Darstellung der Feldstärken .....	186
8.3 Fernfeldnäherungen.....	189
8.3.1 Fresnel-Näherung.....	191
8.3.2 Fraunhofer-Näherung .....	192
8.3.3 Fernfeldabstand und Antennengewinn .....	195
8.3.4 Fernfelder und Fourier-Transformation .....	197
8.4 Ausstrahlungsbedingung.....	200
8.5 Kantenbedingung.....	201
8.6 Huygenssches Prinzip.....	203
8.6.1 Vektorielle Formulierung.....	203
8.6.2 Skalare Formulierung .....	206
8.7 Kopolarisation und Kreuzpolarisation.....	211
8.8 Übungen .....	214
<b>9 Elementardipole und Rahmenantennen .....</b>	215
9.1 Elektrischer Elementarstrahler .....	215
9.1.1 Strahlungsfelder .....	216
9.1.2 Wellengeschwindigkeiten und Nahfeldablösung.....	223
9.2 Magnetischer Elementarstrahler .....	227
9.3 Kreisförmige Rahmenantenne beliebigen Umfangs .....	229
9.3.1 Vektorpotenzial eines kreisförmigen Ringstroms.....	230
9.3.2 Kreisförmige Rahmenantenne mit Umfang $U = n \lambda_0$ .....	233
9.3.3 Erweiterung auf beliebigen Umfang.....	235
9.4 Übungen .....	241

---

<b>10 Lineare Antennen .....</b>	242
10.1 Zylinderantenne .....	243
10.2 Dünne Linearantenne .....	244
10.2.1 Strahlungsfelder .....	244
10.2.2 Wanderwellenantenne (Langdrahtantenne) .....	253
10.2.3 Strahlungswiderstand .....	256
10.2.4 Verkürzungsfaktor .....	263
10.2.5 Richtfaktor und Gewinn .....	266
10.3 Übungen .....	269
<b>11 Gruppenantennen .....</b>	270
11.1 Gruppenfaktor bei räumlicher Anordnung .....	272
11.2 Lineare Gruppen .....	273
11.2.1 Gruppencharakteristik .....	273
11.2.2 Querstrahler .....	278
11.2.3 Längsstrahler .....	280
11.2.4 Richtfaktor linearer Gruppen .....	284
11.2.5 Kreuzdipol .....	287
11.2.6 Yagi-Uda-Antenne .....	288
11.2.7 Phasengesteuerte Gruppenantennen .....	290
11.2.8 Inhomogene Amplitudenbelegung .....	292
11.2.9 Verdünnte Gruppen .....	296
11.3 Ebene Gruppen .....	299
11.4 Antennen über Erde .....	300
11.5 Strahlungskopplung in ebenen Dipolgruppen .....	307
11.6 Übungen .....	309
<b>12 Breitbandantennen .....</b>	310
12.1 Doppelkonusantenne .....	310
12.1.1 Unendlich lange symmetrische Doppelkonusleitung .....	311
12.1.2 Symmetrische Doppelkonusantenne endlicher Länge .....	312
12.1.3 Näherungslösung bei kleinem Reflexionsfaktor .....	319
12.1.4 Doppelkonusantenne mit optimiertem Gewinn .....	324
12.2 Logarithmisch-periodische Antenne .....	325
12.3 Spiral- und Fraktalantennen .....	329
12.4 Übungen .....	331
<b>13 Aperturstrahler I (Hohlleiterantennen) .....</b>	332
13.1 Prinzipien der Aperturstrahler .....	332
13.2 Ebene Apertur im freien Raum (Chu-Modell) .....	334
13.3 Ebene Apertur im unendlichen ebenen Schirm (E-Feld-Modell) .....	340
13.3.1 Hohlleiterstrahler .....	341
13.3.2 Richtfaktor und Flächenwirkungsgrad .....	346
13.4 Übungen .....	348

---

<b>14 Aperturstrahler II (Hornantennen) .....</b>	349
14.1 Bauformen.....	349
14.2 Sektorhorn.....	349
14.3 Pyramidenhorn .....	353
14.4 Kegelhorn und Rillenhorn .....	359
14.4.1 Phasenfehler in der ebenen Hornapertur .....	359
14.4.2 Berechnungsverfahren.....	360
14.4.3 Optimale Bauweise .....	363
14.5 Übungen .....	365
<b>15 Aperturstrahler III (Linsenantennen) .....</b>	366
15.1 Konvexe Verzögerungslinse.....	366
15.2 Aperturlinse im optimalen Kegelhorn .....	369
15.2.1 Einfluss des Linsenmaterials .....	370
15.2.2 Berechnungsbeispiel .....	372
15.3 Konkave Beschleunigungslinse .....	374
15.4 Luneburg-Linse .....	375
15.5 Übungen .....	376
<b>16 Aperturstrahler IV (Reflektorantennen) .....</b>	377
16.1 Bauformen.....	377
16.2 Mehrspiegelantennen.....	380
16.3 Entwurf einer Cassegrain-Antenne .....	381
16.4 Gewinnverlust durch Aperturabschattung .....	385
16.5 Gewinnverlust durch Fehler der Oberflächenkontur .....	386
16.6 Gewinnverlust durch inhomogene Amplitudenbelegung.....	390
16.7 Übungen .....	393
<b>17 Spezielle Antennenformen .....</b>	394
17.1 Streifenleitungsantenne .....	394
17.1.1 Grundlegende Entwurfsrichtlinien .....	394
17.1.2 Cavity-Modell für ein Patch mit abgeschnittenem Substrat (Fall ①) .....	399
17.1.3 Grundplatte und Substrat mit unendlicher Ausdehnung (Fall ②+③) .....	401
17.1.4 Numerische Ergebnisse .....	403
17.1.5 Strahlungsleistung, Strahlungsleitwerte und Richtfaktor im Fall ② .....	404
17.1.6 Gruppenantennen in Streifenleitungstechnik.....	406
17.2 Schlitzantenne .....	408
17.3 Wendel- oder Helixantenne .....	412
17.4 Dielektrische Oberflächenwellenantenne .....	416
17.5 Übungen .....	418

---

<b>Anhang .....</b>	419
A Mathematische Formeln.....	419
A.1 Konstanten.....	419
A.2 Trigonometrische Beziehungen .....	419
A.3 Reihenentwicklungen für kleine Argumente.....	419
A.4 Asymptotische Darstellungen für große Argumente.....	420
A.5 Beziehungen zwischen Besselfunktionen .....	420
A.6 Nützliche Integrale .....	420
A.7 Lommelsche Funktionen mit einem Index und zwei Argumenten.....	421
A.8 Krummlinige orthogonale Koordinatensysteme .....	422
B Elektrotechnische Formeln .....	423
B.1 Abkürzungen .....	423
B.2 Grundgleichungen .....	423
B.3 Vektorpotenziale .....	423
B.4 Feldgrößen.....	423
B.5 Verschiedenes.....	423
C Formeln zum Antennendesign.....	424
C.1 Schlanke Dipolantennen im Freiraum mit Mittelpunktspeisung .....	424
C.2 Gruppencharakteristik linearer Antennengruppen .....	424
C.3 Strahlung einer linearen Belegung bzw. einer Rechteckapertur .....	425
C.4 Strahlung einer Kreisapertur.....	425
C.5 Ausbreitungskonstanten von Hohlleiterwellen .....	425
C.6 Hornstrahler mit Maximalgewinn bei fester Baulänge .....	426
C.7 Beam efficiency und pattern factor elektrisch großer Antennen.....	426
D Eigenschaften ausgewählter Materialien.....	427
C.1 Relative Permittivität und Verlustfaktor (bei 300 K und 3 GHz) .....	427
C.2 Elektrische Leitfähigkeit von Metallen (bei 300 K) .....	427
Englische Übersetzungen wichtiger Fachbegriffe .....	428
Literaturverzeichnis .....	430
Sachwortverzeichnis .....	439
Personenverzeichnis.....	446