

1 Einleitung	1
1.1 Frequenzbereiche	1
1.2 Elektromagnetische Grundgrößen	2
1.3 Antennen und Strahlungsfelder im Überblick	4
2 Mathematische Grundlagen	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	27
2.3 Koordinatensysteme	28
2.4 Übungen	30
3 Grundlagen der Elektrodynamik	31
3.1 Energieerhaltungssatz	31
3.1.1 Darstellung im Zeitbereich	31
3.1.2 Darstellung im Frequenzbereich	33
3.1.3 Komplexer Poyntingscher Satz	36
3.2 Maxwell'sche Gleichungen	39
3.2.1 Grundgleichungen	39
3.2.2 Einteilung der elektromagnetischen Felder	41
3.2.3 Prinzip von der Ladungserhaltung	41
3.2.4 Quellen der Vektorfelder	43
3.3 Wellengleichung	45
3.4 Helmholtz-Gleichung	46
3.5 Wellenausbreitung in anisotropen Medien	48
3.6 Rand- und Stetigkeitsbedingungen	49
3.7 Übungen	51
4 Ebene Wellen	52
4.1 Ebene Wellen im Dielektrikum	52
4.1.1 Lösung der Helmholtz-Gleichung	52
4.1.2 Geschwindigkeitsdefinitionen	56
4.2 Ebene Wellen im Leiter	61
4.2.1 Skineffekt	61
4.2.2 EMV-Abschirmbleche	63

4.2.3	Verlustlose Bandleitung	64
4.2.4	Bandleitung mit Verlusten	65
4.2.5	Wandimpedanz-Modell	68
4.2.6	Kreiszyklindrischer Draht	72
4.3	Ebene Wellen im Supraleiter	82
4.3.1	Londonsche Gleichungen	83
4.3.2	Telegrafien- und Helmholtz-Gleichung	84
4.4	Leistungstransport	88
4.5	Übungen	90
5	Ausbreitungseffekte	91
5.1	Polarisation	91
5.2	Senkrechter Einfall auf eine ebene Trennfläche	95
5.2.1	Reflexions- und Durchlassfaktoren	96
5.2.2	Stehende Wellen	99
5.2.3	Leistungstransport	102
5.2.4	Strahlungsdruck	103
5.3	Schiefer Einfall auf eine ebene Trennfläche	104
5.3.1	Brechungsgesetz	104
5.3.2	Fresnelsche Formeln	108
5.3.3	Totaltransmission	112
5.3.4	Totalreflexion	118
5.4	Ebenes Drei- und Mehrschichtenproblem	121
5.4.1	Ebenes Dreischichtenproblem	121
5.4.2	Schirmwirkung metallischer Wände	122
5.4.3	Verlustloser Viertelwellen-Transformator	123
5.4.4	Verlustloser Halbwellen-Transformator	123
5.4.5	Durchgangsdämpfung von Fensterglas	124
5.5	Beugung an einer metallischen Schirmkante	127
5.6	Übungen	129
6	TEM-Wellen auf Leitungen	130
6.1	Leitungsbeläge von TEM-Leitungen	130
6.1.1	Innere Induktivität und Wandstromverluste	131
6.1.2	Äußere Induktivität, Kapazität und Verluste im Dielektrikum	134
6.2	Spannungs- und Stromwellen auf TEM-Leitungen	137
6.2.1	Leitungsgleichungen	137
6.2.2	Reflexionsfaktor, Welligkeit und Leitungsimpedanz	139
6.2.3	Transformationsverhalten von Leitungen	144
6.3	Doppelleitung	150
6.3.1	Modellbildung	150
6.3.2	Statischer Ableitungsbelag	151
6.3.3	Dynamischer Ableitungsbelag	152
6.3.4	Dämpfungskonstante	154
6.3.5	Phasenkonstante	157
6.3.6	Leitungswellenimpedanz	160
6.4	Koaxialleitung	161

6.5 Einschwingverhalten von TEM-Leitungen	164
6.6 Übungen	169
7 Wellenleiter	170
7.1 Schwingungsformen in Hohlleitern	171
7.2 Rechteckhohlleiter	176
7.2.1 Eigenwellen	176
7.2.2 Grenzfrequenzen und Cutoff	180
7.2.3 Wellengeschwindigkeiten	186
7.2.4 Feldkomponenten und Leistungstransport	187
7.2.5 Materialmessungen in Hohlleitern	192
7.2.6 Hohlleiterschaltungen und Orthogonalentwicklung	194
7.3 Rundhohlleiter	198
7.3.1 Eigenwellen	199
7.3.2 Feldbilder	204
7.4 Höhere Wellentypen der Koaxialleitung	205
7.5 Besondere Hohlleitertypen	208
7.6 Hohlraumresonatoren	211
7.7 Anregung von Hohlleiterwellen	212
7.7.1 Modellbildung	212
7.7.2 Lösung der Helmholtz-Gleichung	213
7.7.3 Koaxiale Stifteinkopplung	215
7.8 Übungen	218
8 Dispersion in Hohlleitern	219
8.1 Impulse mit einer kosinusförmigen Einhüllenden	219
8.2 Impulse mit einer gaußförmigen Einhüllenden	221
8.2.1 Gaußimpuls im Zeit- und Frequenzbereich	221
8.2.2 Signal am Ausgang des Hohlleiters	223
8.2.3 Optimale Impulsdauer	227
8.2.4 Augendiagramm	228
8.2.5 Maximal zulässige Bitrate	230
8.3 Impulse mit einer rechteckigen Einhüllenden	235
8.3.1 Rechteckiger Einzelimpuls	235
8.3.2 Folge aus Rechteckimpulsen	238
8.3.3 Zusammenhang zwischen Impulsverzerrungen und Bandbreite	239
8.3.4 Impulsfolge mit Bandbegrenzung	241
8.4 Übungen	244
9 Grundbegriffe der Antennentechnik	245
9.1 Isotroper Strahler	245
9.2 Hertzscher Dipol als elektrischer Elementarstrahler	245
9.3 Kenngrößen von Antennen	247
9.3.1 Richtdiagramm	247
9.3.2 Richtfaktor und Gewinn	252
9.3.3 Äquivalenter Raumwinkel	254
9.3.4 Antennenwirkfläche	256

9.3.5 Polarisation	260
9.4 Leistungsbilanz einer ungestörten Funkstrecke	262
9.5 Übungen	265
10 Relativistische Elektrodynamik.....	266
10.1 Relativitätsprinzip.....	266
10.1.1 Lorentz-Transformation	267
10.1.2 Feld einer gleichförmig bewegten Ladung	272
10.2 Strahlung beschleunigter Ladungen.....	274
10.2.1 Grundgleichungen	274
10.2.2 Strahlungsleistung	277
10.3 Linear beschleunigte Punktladung.....	278
10.3.1 Strahlungsleistung	278
10.3.2 Richtcharakteristik	280
10.4 Kreisförmig beschleunigte Punktladung.....	281
10.4.1 Strahlungsleistung	281
10.4.2 Richtcharakteristik	282
10.4.3 Teilchenbeschleuniger LEP und LHC	283
10.4.4 Spektrum der Synchrotronstrahlung.....	285
10.4.5 Plasmakühlung durch Synchrotronstrahlung	288
10.5 Radarreflexion an bewegten Objekten.....	289
10.5.1 Gleichförmig bewegter ebener Metallspiegel.....	289
10.5.2 Doppler-Effekt und Aberration	291
10.6 Übungen	294
11 Grundbegriffe von Strahlungsfeldern	295
11.1 Grundgleichungen	295
11.2 Potenziallösung der Feldgleichungen	297
11.2.1 Magnetisches Vektorpotenzial	298
11.2.2 Elektrisches Vektorpotenzial.....	304
11.2.3 Darstellung der Feldstärken.....	305
11.3 Fernfeldnäherungen	308
11.3.1 Fresnel-Näherung	310
11.3.2 Fraunhofer-Näherung	311
11.3.3 Fernfeldabstand und Antennengewinn	314
11.3.4 Fernfelder und Fourier-Transformation.....	316
11.4 Ausstrahlungsbedingung.....	319
11.5 Kantenbedingung.....	320
11.6 Huygenssches Prinzip.....	322
11.6.1 Vektorielle Formulierung.....	322
11.6.2 Skalare Formulierung.....	325
11.7 Kopolarisation und Kreuzpolarisation.....	331
11.8 Übungen	334

12 Elementardipole und Rahmenantennen	335
12.1 Elektrischer Elementarstrahler	335
12.1.1 Strahlungsfelder	336
12.1.2 Wellengeschwindigkeiten und Nahfeldablösung.....	343
12.2 Magnetischer Elementarstrahler	336
12.3 Kreisförmige Rahmenantenne beliebigen Umfangs	349
12.3.1 Vektorpotenzial eines kreisförmigen Ringstroms.....	350
12.3.2 Kreisförmige Rahmenantenne mit Umfang $U = n \lambda_0$	353
12.3.3 Erweiterung auf beliebigen Umfang.....	355
12.4 Übungen	361
13 Lineare Antennen	362
13.1 Zylinderantenne	363
13.2 Dünne Linearantenne.....	364
13.2.1 Strahlungsfelder	364
13.2.2 Wanderwellenantenne (Langdrahtantenne).....	373
13.2.3 Strahlungswiderstand	376
13.2.4 Verkürzungsfaktor.....	383
13.2.5 Richtfaktor und Gewinn	386
13.3 Übungen	389
14 Gruppenantennen	390
14.1 Gruppenfaktor bei räumlicher Anordnung	392
14.2 Lineare Gruppen.....	393
14.2.1 Gruppencharakteristik	393
14.2.2 Querstrahler.....	398
14.2.3 Längsstrahler.....	400
14.2.4 Richtfaktor linearer Gruppen	404
14.2.5 Kreuzdipol	407
14.2.6 Yagi-Uda-Antenne	408
14.2.7 Phasengesteuerte Gruppenantennen	410
14.2.8 Inhomogene Amplitudenbelegung	412
14.2.9 Verdünnte Gruppen.....	416
14.3 Ebene Gruppen.....	419
14.4 Antennen über Erde.....	420
14.5 Strahlungskopplung in ebenen Dipolgruppen.....	427
14.6 Übungen	429
15 Breitbandantennen	430
15.1 Doppelkonusantenne	430
15.1.1 Unendlich lange symmetrische Doppelkonusleitung.....	431
15.1.2 Symmetrische Doppelkonusantenne endlicher Länge	432
15.1.3 Näherungslösung bei kleinem Reflexionsfaktor.....	439
15.1.4 Doppelkonusantenne mit optimiertem Gewinn	444
15.2 Logarithmisch-periodische Antenne	445
15.3 Spiral- und Fraktalantennen.....	449
15.4 Übungen	451

16 Aperturstrahler I (Hohlleiterantennen)	452
16.1 Prinzipien der Aperturstrahler	452
16.2 Ebene Apertur im freien Raum (Chu-Modell)	454
16.3 Ebene Apertur im unendlichen ebenen Schirm (E-Feld-Modell)	461
16.3.1 Hohlleiterstrahler.....	462
16.3.2 Richtfaktor und Flächenwirkungsgrad.....	467
16.4 Übungen	469
17 Aperturstrahler II (Hornantennen)	470
17.1 Bauformen	470
17.2 Sektorhorn	470
17.3 Gültigkeitsgrenzen der quadratischen Näherung	474
17.4 Pyramidenhorn	475
17.4.1 Direktivität und Flächenwirkungsgrad	475
17.4.2 Aperturabmessungen	479
17.4.3 Breite der Hauptkeule	479
17.4.4 Berechnungsbeispiele.....	481
17.5 Kegelhorn und Rillenhorn	483
17.5.1 Phasenfehler in der ebenen Hornapertur	483
17.5.2 Aperturbelegung im Kegelhorn	484
17.5.3 Wandimpedanz-Modell des Rillenhorns	484
17.5.4 Aperturbelegung im Rillenhorn.....	486
17.5.5 Integration der Aperturfelder des Rillenhorns.....	486
17.5.6 Keulenbreiten des Rillenhorns	488
17.5.7 Direktivität von Rillenhorn und Kegelhorn.....	491
17.5.8 Optimale Bauweise	492
17.6 Skalarhorn	494
17.7 Übungen	499
18 Aperturstrahler III (Linsenantennen)	500
18.1 Konvexe Verzögerungslinse	500
18.2 Aperturlinse im optimalen Kegelhorn	503
18.2.1 Einfluss des Linsenmaterials	504
18.2.2 Berechnungsbeispiel.....	506
18.3 Konkave Beschleunigungslinse	508
18.4 Luneburg-Linse	509
18.5 Übungen	510
19 Aperturstrahler IV (Reflektorantennen)	511
19.1 Bauformen	511
19.2 Rotationsparaboloid mit direkter Speisung.....	514
19.3 Mehrspiegelantennen.....	515
19.4 Entwurf einer Cassegrain-Antenne	516
19.5 Gewinnverlust durch Aperturabschattung.....	520
19.6 Gewinnverlust durch Fehler der Oberflächenkontur.....	521
19.7 Gewinnverlust durch inhomogene Amplitudenbelegung.....	525
19.8 Übungen	528

20 Aperturstrahler V (Schwarzer Strahler)	529
20.1 Schwarzkörperstrahlung und das Plancksche Strahlungsgesetz	529
20.2 Das Wiensche Verschiebungsgesetz	533
20.3 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz	534
20.4 Die spektrale Verteilung der Planckschen Strahlungsfunktion	535
20.4.1 Darstellung mit normiertem Argument	535
20.4.2 Quantile der Planckschen Strahlungsfunktion	536
20.4.3 Universelle Strahlungskurven	537
20.5 Radiometrische und photometrische Größen	539
20.6 Beleuchtungsstärke	544
20.7 Die Solarkonstante	546
20.8 Anwendungen in der Photovoltaik	547
20.9 Übungen	548
21 Streifenleitungsantennen	549
21.1 Grundlegende Entwurfsrichtlinien	549
21.1.1 Bauformen und Einspeisung	549
21.1.2 Mikrostreifenleitungen und rechteckige Patch-Elemente	550
21.2 Parasitäre Oberflächenwellen auf einlagigen Substraten	555
21.2.1 Eigenwertgleichungen und Grenzfrequenzen	555
21.2.2 Synchrone Verkopplung	559
21.2.3 Feldbilder	560
21.3 Parasitäre Oberflächenwellen auf zweilagigen Substraten	561
21.4 Leistungsbetrachtungen	562
21.4.1 Leistung der Raumwelle	562
21.4.2 Leistung der TM_0 -Oberflächenwelle	564
21.4.3 Strahlungswirkungsgrad	565
21.5 Bandbreite	566
21.6 Analyse mit Hilfe des Cavity-Modells	568
21.6.1 Patch mit abgeschnittenem Substrat (Fall ①)	568
21.6.2 Grundplatte und Substrat mit unendlicher Ausdehnung (Fälle ②+③)	571
21.6.3 Kopolare und kreuzpolare Abstrahlung in den Fällen ① und ③	572
21.6.4 Weitere numerische Ergebnisse	574
21.6.5 Strahlungsleistung, Strahlungsleitwerte und Richtfaktor im Fall ②	575
21.7 Gruppenantennen in Streifenleitungstechnik	577
21.8 Übungen	579
22 Spezielle Antennenformen	580
22.1 Schlitzantenne	580
22.2 Wendel- oder Helixantenne	584
22.3 Dielektrische Oberflächenwellenantenne	588
22.4 Übungen	591
Anhang	592
A Mathematische Formeln	592
A.1 Konstanten	592

A.2	Trigonometrische Beziehungen	592
A.3	Funktionen mit komplexem Argument	592
A.4	Reihenentwicklungen für kleine Argumente.....	593
A.5	Asymptotische Darstellungen für große Argumente.....	593
A.6	Zylinderfunktionen und sphärische Zylinderfunktionen	594
A.7	Legendre-Polynome und ihre Ableitungen	594
A.8	Nützliche Integrale	595
A.9	Lommelsche Funktionen mit einem Index und zwei Argumenten.....	596
A.10	Modifizierte Besselfunktionen mit ganzzahligem Index	597
A.11	Krummlinige orthogonale Koordinatensysteme	598
B	Elektrotechnische Formeln	599
B.1	Abkürzungen	599
B.2	Grundgleichungen	599
B.3	Vektorpotenziale	599
B.4	Feldgrößen.....	599
B.5	Verschiedenes.....	599
C	Formeln zum Antennendesign.....	600
C.1	Schlanke Dipolantennen im Freiraum mit Mittelpunktspeisung	600
C.2	Gruppencharakteristik linearer Antennengruppen	600
C.3	Strahlung einer linearen Belegung bzw. einer Rechteckapertur	601
C.4	Strahlung einer Kreisapertur.....	601
C.5	Ausbreitungskonstanten von Hohlleiterwellen	601
C.6	Hornstrahler mit Maximalgewinn bei fester Baulänge	602
C.7	Beam efficiency und pattern factor elektrisch großer Antennen.....	602
C.8	Näherung für den Hauptkeulenverlauf verschiedener Antennen.....	603
D	Eigenschaften ausgewählter Materialien.....	604
D.1	Relative Permittivität und Verlustfaktor (bei 300 K und 3 GHz)	604
D.2	Elektrische Leitfähigkeit von Metallen (bei 300 K)	604
E	Streuparameter.....	605
E.1	Streumatrix	605
E.2	Reflexion, Transmission und Welligkeit.....	606
F	Integral-Transformationen.....	607
F.1	Laplace-Transformation.....	607
F.2	Fourier-Transformation.....	608
	Englische Übersetzungen wichtiger Fachbegriffe.....	609
	Literaturverzeichnis	611
	Sachwortverzeichnis	624
	Personenverzeichnis.....	634