

Vorwort

Die moderne Informationsgesellschaft zeigt einen zunehmenden Bedarf an schneller Verarbeitung und Übertragung großer Datenmengen. So ist z. B. die dynamische Entwicklung im Bereich des Mobilfunks und bei den Funknetzwerken noch lange nicht abgeschlossen. Notwendige hohe Datenraten bedingen breitbandige Spektren der beteiligten Signale, die sich als elektromagnetische Wellen entlang von Leitungen oder im Funkfeld ausbreiten. Mit dem weiteren Vordringen der drahtlosen Nachrichtentechnik in immer höhere Frequenzbereiche und in neue Anwendungsgebiete muss auch eine Fülle neuer Antennenformen entwickelt werden, wobei man sich die enormen Fortschritte bei den Berechnungsmethoden mit Hilfe rechnergestützter Simulationsverfahren zu Nutze macht. Verschiedene **Anwendungsbereiche** der modernen Kommunikationstechnik wie z. B. Ortung, Navigation, Mobilfunk, Richtfunk, Satellitenfunk sowie die Raumfahrt wären ohne eine weit entwickelte Antennentechnik undenkbar.

Dieses Buch basiert auf zweisemestrigen Vorlesungen, die für Studierende der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Hochschule Ravensburg-Weingarten seit 16 Jahren gehalten werden. Es wendet sich auch an Studierende verwandter Fachgebiete sowie an Ingenieure und Naturwissenschaftler, die mit Fragestellungen zur Abstrahlung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen betraut sind. Das Buch eignet sich zum vertiefenden Selbststudium neben der Vorlesung, zur Prüfungsvorbereitung oder als praktisches Nachschlagewerk für alle Funkanwender.

Der Inhalt gliedert sich in 17 Kapitel. In den **Kapiteln 1 bis 6** wird eine solide mathematische Basis für die Theorie elektromagnetischer Felder und Wellen gelegt und daraus werden die Methoden der Elektrodynamik ausführlich entwickelt. An einfachen Beispielen (TEM-Welle im Freiraum, Hohlleiterwellen) werden erste Feldlösungen hergeleitet. Wer in der Elektrodynamik bereits ausreichende Erfahrungen mitbringt, kann diese Einführung zunächst überblättern oder dort gegebenenfalls einzelne Details wieder auffrischen, um dann direkt in **Kapitel 7** einzusteigen, wo die Grundbegriffe der Antennentechnik behandelt werden. Das **Kapitel 8** bietet eine Vertiefung für mathematisch orientierte Leser und kann von eher technisch interessierten eventuell ausgelassen werden. Die **Kapitel 9 bis 17** können weitgehend unabhängig voneinander bearbeitet werden, da sie sich jeweils mit ausgewählten Antennenformen beschäftigen:

- (9) Elementardipole und Rahmenantennen
- (10) Lineare Antennen
- (11) Gruppenantennen
- (12) Breitbandantennen
- (13) Hohlleiterantennen
- (14) Hornantennen
- (15) Linsenantennen
- (16) Reflektorantennen
- (17) Streifenleitungsantennen, Schlitzantennen, Helixantennen und Stielstrahler.

In diesen Kapiteln wird der Leser an praxisorientierte Fragestellungen bei der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen durch verschiedenste Antennentypen herangeführt. Ein benutzerfreundlicher **Anhang** stellt wichtige Formeln kompakt zusammen und erleichtert das Nachschlagen häufig gebrauchter Ergebnisse.

Viele durch Computersimulationen berechnete Felddiagramme und Richtdiagramme machen die Elektrodynamik anschaulich begreifbar und ermöglichen ein tiefer gehendes Verständnis. Es wurde neben einer nachvollziehbaren Ausarbeitung der mathematischen Methoden großer Wert auf die physikalische Interpretation und Visualisierung der erhaltenen Ergebnisse gelegt, wozu 259 Abbildungen und 80 Tabellen wesentlich beitragen.

In der komplett überarbeiteten **dritten Auflage** wurden im gesamten Text an vielen Stellen kleinere Änderungen und Ergänzungen vorgenommen, die zum besseren Verständnis beitragen. Außerdem wurden alle bekannt gewordenen Druckfehler beseitigt und die Literaturangaben auf den neuesten Stand gebracht.

Insbesondere sind folgende **Neuerungen** im Vergleich zur zweiten Auflage hervorzuheben: exakte Darstellung der elektrischen Feldlinien des Hertzschen Dipols als Höhenlinien einer Potenzialfunktion, Neuberechnung des Verkürzungsfaktors von Dipolantennen unter Berücksichtigung der Breite ihres Speisespaltes, Entwurfsbeispiel für eine Multiband-Fraktalantenne, erweiterte Betrachtungen zum Gewinn von optimalen Rillen- und Kegelhörnern, verbesserte Designformeln für Helixantennen und erweiterte Behandlung dielektrischer Stielstrahler für Anwendungen im Millimeterwellenbereich. Klassische Entwurfsformeln für die genannten Antennenformen wurden durch **numerische Simulationen** mit modernen 3D-Gitterverfahren nochmals überprüft und konnten in manchen Fällen in ihrer Genauigkeit gesteigert werden.

Das Sachwortverzeichnis wurde nochmals erweitert. Mit nun 128 anwendungsbezogenen Übungsaufgaben (mehrheitlich mit vollständigen Lösungen) wird eine noch bessere Vertiefung ermöglicht. Bei weiterführenden Problemen helfen jetzt 233 Literaturangaben – wieder mehr als bei der vorherigen Auflage, da in den vergangenen drei Jahren viele neue Veröffentlichungen hinzugekommen sind. In 69 Kurzbiografien werden bahnbrechende Arbeiten bekannter Wissenschaftler gewürdigt, die maßgeblich zur Entwicklung der Elektrodynamik und der Antennentechnik beigetragen haben.

Ich danke dem Vieweg+Teubner Verlag für die sehr gute Zusammenarbeit und dafür, dass auf meine Änderungs- und Ergänzungswünsche für die vorliegende dritte Auflage verständnisvoll eingegangen wurde. Ein besonderer **Dank** gilt meinen Studierenden und allen Lesern, die wertvolle Anregungen und Verbesserungsvorschläge gemacht haben. Insbesondere habe ich mich über die freundliche Aufnahme der ersten beiden Auflagen durch die Leserschaft sehr gefreut. Ein ausdrücklicher Dank gilt wieder meiner lieben Frau, Elisabeth Hübner-Kark, die meine Bemühungen um die umfangreiche Überarbeitung der zweiten Auflage in jeder Weise unterstützt hat.

Bad Wurzach, im September 2009

Klaus W. Kark

E-Mail: kark@hs-weingarten.de

Internet: <http://www.hs-weingarten.de/~kark/>

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Frequenzbereiche	1
1.2 Elektromagnetische Grundgrößen	2
1.3 Antennen und Strahlungsfelder im Überblick	4
2 Mathematische Grundlagen	7
2.1 Vektorrechnung	7
2.1.1 Skalarprodukt	8
2.1.2 Vektorprodukt	9
2.1.3 Spatprodukt	10
2.2 Vektoranalysis	12
2.2.1 Differenziation von skalaren Feldern	12
2.2.2 Differenziation von Vektorfeldern	15
2.2.3 Rechnen mit dem Nabla-Operator	19
2.2.4 Integralsätze der Vektoranalysis	22
2.2.5 Helmholtzsches Theorem	25
2.3 Koordinatensysteme	26
2.4 Übungen	28
3 Grundlagen der Elektrodynamik	29
3.1 Energieerhaltungssatz	29
3.1.1 Darstellung im Zeitbereich	29
3.1.2 Darstellung im Frequenzbereich	31
3.2 Maxwellsche Gleichungen	32
3.2.1 Grundgleichungen	32
3.2.2 Einteilung der elektromagnetischen Felder	34
3.2.3 Prinzip von der Ladungserhaltung	34
3.2.4 Quellen der Vektorfelder	36
3.3 Wellengleichung	38
3.4 Helmholtz-Gleichung	39
3.5 Wellenausbreitung in anisotropen Medien	41
3.6 Rand- und Stetigkeitsbedingungen	42
3.7 Relativitätsprinzip	44
3.7.1 Lorentz-Transformation	45
3.7.2 Feld einer gleichförmig bewegten Ladung	50
3.8 Strahlung beschleunigter Elektronen	52
3.8.1 Strahlungsleistung	54
3.8.2 Linear beschleunigte Punktladung	55
3.8.3 Kreisförmig beschleunigte Punktladung	56
3.9 Übungen	57
4 Ebene Wellen	58
4.1 Ebene Wellen im Dielektrikum	58
4.1.1 Lösung der Helmholtz-Gleichung	58

4.1.2 Geschwindigkeitsdefinitionen	62
4.2 Ebene Wellen im Leiter	67
4.3 Ebene Wellen im Supraleiter	72
4.3.1 Londonsche Gleichungen	73
4.3.2 Telegraf- und Helmholtz-Gleichung	74
4.4 Leistungstransport	78
4.5 Übungen	80
5 Ausbreitungseffekte	81
5.1 Polarisierung	81
5.2 Senkrechter Einfall auf eine ebene Trennfläche	85
5.2.1 Reflexions- und Durchlassfaktoren	86
5.2.2 Stehende Wellen	89
5.2.3 Leistungstransport	92
5.2.4 Strahlungsdruck	93
5.3 Radarreflexion an bewegten Objekten	94
5.3.1 Gleichförmig bewegter ebener Metallspiegel	94
5.3.2 Doppler-Effekt und Aberration	96
5.4 Schiefer Einfall auf eine ebene Trennfläche	99
5.4.1 Brechungsgesetz	99
5.4.2 Fresnelsche Formeln	103
5.4.3 Totaltransmission	107
5.4.4 Totalreflexion	113
5.5 Ebenes Drei- und Vierschichtenproblem	116
5.6 Beugung an einer metallischen Schirmkante	119
5.7 Übungen	121
6 Wellenleiter	122
6.1 Schwingungsformen in Hohlleitern	123
6.2 Rechteckhohlleiter	127
6.2.1 Eigenwellen	127
6.2.2 Hohlleiterschaltungen und Orthogonalentwicklung	136
6.3 Rundhohlleiter	141
6.3.1 Eigenwellen	141
6.3.2 Feldbilder	146
6.4 Besondere Hohlleitertypen	147
6.5 Hohlraumresonatoren	150
6.6 Koaxialleitung	151
6.6.1 Grundwelle	151
6.6.2 Höhere Wellentypen	153
6.7 Übungen	156
7 Grundbegriffe der Antennentechnik	157
7.1 Isotroper Strahler	157
7.2 Hertzscher Dipol als elektrischer Elementarstrahler	157
7.3 Kenngrößen von Antennen	159
7.3.1 Richtdiagramm	159
7.3.2 Richtfaktor und Gewinn	164

7.3.3 Äquivalenter Raumwinkel.....	166
7.3.4 Antennenwirkfläche	168
7.3.5 Polarisierung	172
7.4 Übungen	174
8 Grundbegriffe von Strahlungsfeldern	175
8.1 Grundgleichungen	175
8.2 Potenziellösung der Feldgleichungen	177
8.2.1 Magnetisches Vektorpotenzial	178
8.2.2 Elektrisches Vektorpotenzial	184
8.2.3 Darstellung der Feldstärken	185
8.3 Fernfeldnäherungen.....	188
8.3.1 Fresnel-Näherung.....	190
8.3.2 Fraunhofer-Näherung	191
8.3.3 Fernfeldabstand und Antennengewinn	194
8.3.4 Fernfelder und Fourier-Transformation	196
8.4 Ausstrahlungsbedingung.....	199
8.5 Kantenbedingung.....	200
8.6 Huygenssches Prinzip.....	202
8.6.1 Vektorielle Formulierung.....	202
8.6.2 Skalare Formulierung	205
8.7 Kopolarisation und Kreuzpolarisation.....	210
8.8 Übungen	213
9 Elementardipole und Rahmenantennen	214
9.1 Elektrischer Elementarstrahler	214
9.1.1 Strahlungsfelder	215
9.1.2 Wellengeschwindigkeiten und Nahfeldablösung.....	222
9.2 Magnetischer Elementarstrahler	226
9.3 Kreisförmige Rahmenantenne beliebigen Umfangs	228
9.3.1 Vektorpotenzial eines kreisförmigen Ringstroms.....	229
9.3.2 Kreisförmige Rahmenantenne mit Umfang $U = n \lambda_0$	232
9.3.3 Erweiterung auf beliebigen Umfang.....	234
9.4 Übungen	240
10 Lineare Antennen	241
10.1 Zylinderantenne.....	242
10.2 Dünne Linearantenne.....	243
10.2.1 Strahlungsfelder	243
10.2.2 Wanderwellenantenne (Langdrahtantenne)	252
10.2.3 Strahlungswiderstand	255
10.2.4 Verkürzungsfaktor.....	262
10.2.5 Richtfaktor und Gewinn	265
10.3 Übungen	268
11 Gruppenantennen	269
11.1 Gruppenfaktor bei räumlicher Anordnung	271
11.2 Lineare Gruppen.....	272
11.2.1 Gruppencharakteristik.....	272

11.2.2	Querstrahler.....	277
11.2.3	Längsstrahler.....	279
11.2.4	Richtfaktor linearer Gruppen.....	283
11.2.5	Kreuzdipol.....	286
11.2.6	Yagi-Uda-Antenne.....	287
11.2.7	Phasengesteuerte Gruppenantennen.....	289
11.2.8	Inhomogene Amplitudenbelegung.....	291
11.2.9	Verdünnte Gruppen.....	295
11.3	Ebene Gruppen.....	298
11.4	Antennen über Erde.....	299
11.5	Strahlungskopplung in ebenen Dipolgruppen.....	306
11.6	Übungen.....	308
12	Breitbandantennen.....	309
12.1	Doppelkonusantenne.....	309
12.1.1	Unendlich lange symmetrische Doppelkonusleitung.....	310
12.1.2	Symmetrische Doppelkonusantenne endlicher Länge.....	311
12.1.3	Näherungslösung bei kleinem Reflexionsfaktor.....	318
12.1.4	Doppelkonusantenne mit optimiertem Gewinn.....	323
12.2	Logarithmisch-periodische Antenne.....	324
12.3	Spiral- und Fraktalantennen.....	328
12.4	Übungen.....	330
13	Aperturstrahler I (Hohlleiterantennen).....	331
13.1	Prinzipien der Aperturstrahler.....	331
13.2	Ebene Apertur im freien Raum (Chu-Modell).....	333
13.3	Ebene Apertur im unendlichen ebenen Schirm (E-Feld-Modell).....	339
13.3.1	Hohlleiterstrahler.....	340
13.3.2	Richtfaktor und Flächenwirkungsgrad.....	345
13.4	Übungen.....	347
14	Aperturstrahler II (Hornantennen).....	348
14.1	Bauformen.....	348
14.2	Sektorhorn.....	348
14.3	Pyramidenhorn.....	352
14.4	Kegelhorn und Rillenhorn.....	358
14.4.1	Phasenfehler in der ebenen Hornapertur.....	358
14.4.2	Berechnungsverfahren.....	359
14.4.3	Optimale Bauweise.....	362
14.5	Übungen.....	364
15	Aperturstrahler III (Linsenantennen).....	365
15.1	Konvexe Verzögerungslinse.....	365
15.2	Konkave Beschleunigungslinse.....	368
15.3	Luneburg-Linse.....	369
15.4	Übungen.....	370
16	Aperturstrahler IV (Reflektorantennen).....	371
16.1	Bauformen.....	371

16.2 Mehrspiegelantennen.....	374
16.3 Entwurf einer Cassegrain-Antenne	375
16.4 Gewinnverlust durch Aperturabschattung	379
16.5 Gewinnverlust durch Fehler der Oberflächenkontur	380
16.6 Gewinnverlust durch inhomogene Amplitudenbelegung.....	384
16.7 Übungen	387
17 Spezielle Antennenformen	388
17.1 Streifenleitungsantenne	388
17.1.1 Grundlegende Entwurfsrichtlinien	388
17.1.2 Strahlungsfelder nach dem Cavity-Modell.....	391
17.1.3 Gruppenantennen in Streifenleitungstechnik.....	395
17.2 Schlitzantenne	397
17.3 Wendel- oder Helixantenne.....	401
17.4 Dielektrische Oberflächenwellenantenne	405
17.5 Übungen	407
Anhang	408
A Mathematische Formeln	408
A.1 Konstanten.....	408
A.2 Trigonometrische Beziehungen.....	408
A.3 Reihenentwicklungen für kleine Argumente	408
A.4 Asymptotische Darstellungen für große Argumente.....	409
A.5 Beziehungen zwischen Besselfunktionen.....	409
A.6 Nützliche Integrale	409
A.7 Lommelsche Funktionen mit einem Index und zwei Argumenten.....	410
A.8 Krummlinige orthogonale Koordinatensysteme	411
B Elektrotechnische Formeln	412
B.1 Abkürzungen	412
B.2 Grundgleichungen	412
B.3 Vektorpotenziale	412
B.4 Feldgrößen.....	412
B.5 Verschiedenes.....	412
C Formeln zum Antennendesign	413
C.1 Schlanke Dipolantennen im Freiraum mit Mittelpunktspeisung.....	413
C.2 Gruppencharakteristik linearer Antennengruppen	413
C.3 Strahlung einer linearen Belegung bzw. einer Rechteckapertur	414
C.4 Strahlung einer Kreisapertur.....	414
C.5 Ausbreitungskonstanten von Hohlleiterwellen	414
C.6 Hornstrahler mit Maximalgewinn bei fester Baulänge	415
C.7 Beam efficiency und pattern factor elektrisch großer Antennen.....	415
Englische Übersetzungen wichtiger Fachbegriffe	416
Literaturverzeichnis	417
Sachwortverzeichnis	425
Personenverzeichnis.....	432

Formelzeichen und Abkürzungen

Naturkonstanten

c_0	$2,99792458 \cdot 10^8$ m/s
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am)
ε_0	$1/(\mu_0 c_0^2) \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/(Vm)
Z_0	$\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \approx 376,73 \Omega$
h	$6,6260688 \cdot 10^{-34}$ Js
k	$1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K
e	$1,6021765 \cdot 10^{-19}$ C
m_e	$9,1093819 \cdot 10^{-31}$ kg

Allgemeines

\underline{A}	komplexe Amplitude
$\text{Im}\{A\}$	Imaginärteil
$\text{Re}\{A\}$	Realteil
\mathbf{A}	Vektor
$ \mathbf{A} = A$	Betrag eines Vektors
A_i	Vektorkomponente
A_n, A_t	normale, tangentielle Komponente
A_{\parallel}	parallele Komponente
A_{\perp}	senkrechte Komponente
$\underline{\mathbf{A}}$	komplexer Vektor
$\underline{\mathbf{A}}^*$	konjugiert komplexer Vektor
$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$	Skalarprodukt
$\mathbf{A} \times \mathbf{B}$	Vektorprodukt
$[\mathbf{A}]$	Matrix
$[\mathbf{A}]^{-1}$	inverse Matrix
$\varepsilon * \mathbf{E}$	Faltungintegral $\int \varepsilon(\tau) \mathbf{E}(t - \tau) d\tau$
∂	partielle Ableitung
δ_{mn}	Kronecker-Symbol
ε_{ij}	Tensor
$d\Phi$	totales Differenzial
div	Divergenz
grad	Gradient
rot	Rotation
lim	Limes (Grenzwert)
∇	Nabla-Operator
Δ_t	transversaler Laplace-Operator
Δ, ∇^2	Laplace-Operator
\square^2	d'Alembert-Operator
$\langle S \rangle$	Mittelwert
\parallel	parallel
\perp	senkrecht

\angle	Winkel
∞	unendlich
\propto	proportional
\oint, \oiint	Kontur- und Hüllintegrale

Vektoren

$\underline{\mathbf{A}}$	magnetisches Vektorpotenzial, A
\mathbf{B}	magnet. Flussdichte, $T = \text{Vs/m}^2$
\mathbf{D}	elektrische Flussdichte, As/m^2
$d\mathbf{A}$	Flächenelement, m^2
$d\mathbf{r}, ds$	Wegelement, m
\mathbf{E}	elektrische Feldstärke, V/m
$\underline{\mathbf{E}}_A$	elektrische Aperturfeldstärke, V/m
\mathbf{e}_i	Einheitsvektor
\mathbf{F}	Kraft, N
$\underline{\mathbf{F}}$	elektrisches Vektorpotenzial, V
\mathbf{H}	magnetische Feldstärke, A/m
$\underline{\mathbf{H}}_A$	magnetische Aperturfeldstärke, A/m
\mathbf{J}	elektrische Stromdichte, A/m^2
\mathbf{J}_E	eingeprägte Stromdichte, A/m^2
\mathbf{J}_F	elektr. Flächenstromdichte, A/m
\mathbf{J}_K	Konvektionsstromdichte, A/m^2
\mathbf{J}_L	Leitungsstromdichte, A/m^2
\mathbf{J}_n	normalleitende Stromdichte, A/m^2
\mathbf{J}_s	Suprastromdichte, A/m^2
\mathbf{M}	magnetische Stromdichte, V/m^2
\mathbf{M}_F	magnet. Flächenstromdichte, V/m
$\underline{\mathbf{m}}$	magnetisches Dipolmoment, Am^2
\mathbf{n}	normaler Einheitsvektor
$\underline{\mathbf{p}}$	E-Feld-Aperturintegral, Vm
$\underline{\mathbf{p}}$	elektrisches Dipolmoment, Cm
$\underline{\mathbf{p}}$	Impuls, Ns
\mathbf{p}_V	Impulsdichte, Ns/m^3
$\underline{\mathbf{Q}}$	H-Feld-Aperturintegral, Am
$\underline{\mathbf{R}}$	Abstandsvektor, m
\mathbf{r}	Ortsvektor zum Beobachter, m
\mathbf{r}'	Ortsvektor zum Quellpunkt, m
$\underline{\mathbf{S}}$	komplexer Poyntingvektor, W/m^2
$\underline{\mathbf{S}}_R$	reeller Poynting-Vektor, W/m^2
\mathbf{t}	tangentialer Einheitsvektor
\mathbf{v}	Geschwindigkeit, m/s
$\dot{\mathbf{v}}$	Beschleunigung, m/s^2

Lateinische Buchstaben

A	Aperturabmessung, m	F	Brennweite, m
A_W	Wirkfläche, m ²	$\underline{F}(x)$	Fresnelsches Integral
A_{geo}	geometrische Aperturfläche, m ²	F_{eff}	effektive Brennweite, m
a	Längenabmessung, m	F_{Gr}	Gruppenfaktor
a_N	Nebenkeulendämpfung, dB	f	Frequenz, Hz
a_n	Wellenamplitude	$f(x)$	Separationsfunktion
B	Aperturabmessung, m	$f_{1,2}$	Brennweiten, m
B	Bandbreite f_o/f_u	f_c	Grenzfrequenz im Hohlleiter, Hz
B_E	Eingangssuszeptanz, S	f_e	Empfangsfrequenz, Hz
B_r	relative Bandbreite $(f_o - f_u)/f_m$	f_m	Frequenzbandmitte $(f_o + f_u)/2$, Hz
B_s	Strukturbandbreite (LPDA)	f_o	obere Frequenzbandgrenze, Hz
b	Längenabmessung, m	f_R	Resonanzfrequenz, Hz
b_i, b_n	Wellenamplituden	f_s	Sendefrequenz, Hz
C	Kapazität, F	f_u	untere Frequenzbandgrenze, Hz
$C = \ln \gamma$	Eulersche Konstante	G	Gewinn über Kugelstrahler
$C(\vartheta, \varphi)$	Richtcharakteristik	G	elektrischer Leitwert, S
C_E	Elementcharakteristik	G_D	Gewinn über Halbwelldipol
C_{Gr}	Gruppencharakteristik	G_E	Eingangsleitwert, S
$C_{\text{Gr}}^H(\varphi)$	Horizontalschnitt von C_{Gr}	G_H	Gewinn über Hertzschen Dipol
$C_H(\varphi)$	horizontales Richtdiagramm	G_S	Strahlungsleitwert, S
$C_V(\vartheta)$	vertikales Richtdiagramm	$\underline{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$	Greensche Funktion, 1/m
C_{co}	kopolare Richtcharakteristik	g	Ganghöhe bzw. Speisespalt, m
C_{xp}	kreuzpolare Richtcharakteristik	g	logarithmierter Gewinn in dBi
$C(x)$	Fresnelsches Integral	g_d	logarithmierter Gewinn in dBd
$Ci(x)$	Integralkosinus	$g(y)$	Separationsfunktion
c	Lichtgeschwindigkeit, m/s	H, h_E	Höhe über Erde, m
c_0	Vakuumlichtgeschwindigkeit, m/s	$\hat{H}_n^{(2)}(x)$	Riccati-Hankelfunktion
D	Durchmesser einer Apertur, m	h	Längenabmessung, Substrathöhe, m
D	Richtfaktor (Direktivität)	h	Plancksche Konstante, Js
$D(\vartheta, \varphi)$	richtungsabhängiger Richtfaktor	h_i	Metrikoeffizient
D_E	Richtfaktor des E-Sektorhorns	\hbar	$h/(2\pi) \approx 1,05457 \cdot 10^{-34}$ Js
D_H	Richtfaktor des H-Sektorhorns	Δh	elektrische Verlängerung, m
D_K	Richtfaktor des Kegelhorns	I, i	elektrischer Strom, A
D_P	Richtfaktor des Pyramidenhorns	\hat{I}	Stromamplitude, A
D_R	Richtfaktor des Rillenhorns	\underline{I}_0	Speisestrom, A
d	Innendurchmesser, Drahtdicke, m	$\underline{I}_{\text{max}}$	Maximalstrom, A
\underline{d}	Durchlassfaktor	$J_m(x)$	Besselfunktion
dV	Volumenelement, m ³	$J'_m(x)$	Ableitung nach dem Argument
\hat{E}	reelle Amplitude, V/m	$\hat{J}_{\mu_i}(x)$	Riccati-Besselfunktion
\underline{E}_0	komplexe Amplitude, V/m	j	imaginäre Einheit = $\sqrt{-1}$
$\underline{E}_{\text{co}}$	kopolare Feldstärke, V/m	j_{mn}	n-te Nullstelle von J_m
\underline{E}_d	Durchbruchfeldstärke, V/m	j_{mn}	n-te Nullstelle von J_m
$\underline{E}_{\text{xp}}$	kreuzpolare Feldstärke, V/m	K	Eigenwert im Rundhohlleiter, 1/m
e	elektrische Elementarladung, C	$K_{E,H}$	Korrekturfaktoren im Sektorhorn
e	lineare Exzentrizität	k	Boltzmann-Konstante, J/K
		k	Wellenzahl in Materie, 1/m

k_0	Wellenzahl im Vakuum, 1/m	R_V	Verlustwiderstand, Ω
k_c	Grenzwellenzahl im Hohlleiter, 1/m	R_{nm}	Kopplungswiderstand, Ω
k_x, k_y	Eigenwerte Rechteckhohlleiter, 1/m	r	Radius, m
k_p	pattern factor	\underline{r}	Reflexionsfaktor
\underline{k}_z	Ausbreitungskonstante, 1/m	\underline{r}_A	Ausgangsreflexionsfaktor
L	Induktivität, H bzw. Drehimpuls, Js	\underline{r}_E	Eingangsreflexionsfaktor
L, l	Längenabmessung, m	r_g	Grenzradius, m
ΔL	elektrische Verlängerung, m	S	Inertialsystem
l_m	mechanische Dipollänge, m	S	Strahlungsdichte, W/m^2
M	Anzahl der Gruppenelemente	$S(x)$	Fresnelsches Integral
M	Vergrößerung F_{eff}/F	$\text{Si}(x)$	Integralsinus
\underline{M}_{mn}	Lommelsche Hilfsintegrale	s	Schlankheitsgrad
m	Modenindex bzw. Masse, kg	$\text{si}(x)$	si-Funktion
m_e	Elektronenmasse, kg	T	absolute Temperatur, K
N	Anzahl der Gruppenelemente	T_C	Sprungtemperatur, K
N	Windungsanzahl	t	Zeitvariable, s
N	Normierungsfaktor	t_r	retardierte Zeitvariable, s
$N_m(x)$	Neumannfunktion	U	Umfang, m
$N'_m(x)$	Ableitung nach dem Argument	\underline{U}_0	Speisespannung, V
n	Modenindex	$U_n(w, z)$	Lommelsche Funktion
n	Brechungsindex	u	elektrische Spannung, V
n_{m1}	n-te Nullstelle von N_m	u_m	magnetische Spannung, A
n_{mn}	n-te Nullstelle von N_m	V	Verkürzungsfaktor
P	Beobachterpunkt	v	Geschwindigkeit, m/s
P	Wirkleistung, W	v_E	Energiegeschwindigkeit, m/s
P_E	Empfangsleistung, W	v_F	Frontgeschwindigkeit, m/s
P_G	Generatorleistung, W	v_g	Gruppengeschwindigkeit, m/s
P_S	Strahlungsleistung, W	v_p	Phasengeschwindigkeit, m/s
P_V	Verlustleistung, W	W	Patchbreite, m
$P_n(x)$	Legendre-Polynom	w	Gesamtenergiedichte, J/m^3
$P_{\mu_i}(x)$	Kugelfunktion erster Art	w_e	elektrische Energiedichte, J/m^3
p	Modenindex	w_m	magnetische Energiedichte, J/m^3
p_s	Strahlungsdruck, Pa	X	Reaktanz, Ω
Q	Blindleistung, VA, Resonatorgüte	X_E	Eingangsreaktanz, Ω
$Q(\rho)$	Aperturbelegung	X_S	Strahlungsreaktanz, Ω
Q, q	elektrische Ladungsmenge, C	X_{nm}	Kopplungsreaktanz, Ω
$Q_{\mu_i}(x)$	Kugelfunktion zweiter Art	x, y, z	kartesische Koordinaten, m
q	Flächenwirkungsgrad	x_s	Speisepunkt, m
q_m	magnetische Ladungsmenge, Vs	\underline{Y}	Admittanz, S
R	Abstand, m	\underline{Y}_A	Abschlussadmittanz, S
R	elektrischer Widerstand, Ω	\underline{Y}_A	Aperturadmittanz, S
R	Krümmungsradius, m	\underline{Y}_E	Eingangsadmittanz, S
R	Reflexionskoeffizient	y_s	Speisepunkt, m
R_0	Gleichstromwiderstand, Ω	\underline{Z}	Impedanz, Ω
R_E	Eingangswiderstand, Ω	\underline{Z}_A	Abschlussimpedanz, Ω
R_S	Strahlungswiderstand, Ω	\underline{Z}_A	Aperturimpedanz, Ω
		\underline{Z}_E	Eingangsimpedanz, Ω

\underline{Z}_F	Feldwellenimpedanz, Ω
\underline{Z}_L	Leitungswellenimpedanz, Ω
\underline{Z}_S	Strahlungsimpedanz, Ω
\underline{Z}_{nm}	Kopplungsimpedanz, Ω
Z_0	Feldwellenwiderstand des freien Raums, Ω

Griechische Buchstaben

α	Dämpfungs-konstante, 1/m	θ	Winkel
α	Hornöffnungswinkel	θ_B	Brewster-Winkel
α	Steigungswinkel (LPDA)	θ_c	Grenzwinkel der Totalreflexion
β	Phasenkonstante, 1/m	θ_i	Einfallswinkel
β	normierte Geschwindigkeit v/c_0	θ_m	Hauptreflektorwinkel
β	zeitliche Ableitung, 1/s	θ_r	Reflexionswinkel
$\Gamma(x)$	Gammafunktion	θ_s	Subreflektorwinkel
$\underline{\gamma}$	Ausbreitungskonstante, 1/m	θ_t	Brechungswinkel
$\bar{\gamma}(\beta)$	relativistischer Parameter	κ	Korrekturfaktor (Reflektorantenne)
$\Delta\vartheta$	Halbwertsbreite (3-dB-Breite)	κ	elektrische Leitfähigkeit, S/m
$\Delta\vartheta_0$	Nullwertsbreite	κ_n	normale Leitfähigkeit, S/m
$\Delta\varphi$	Halbwertsbreite (3-dB-Breite)	κ_s	Supraleitfähigkeit, S/m
$\Delta\varphi_0$	Nullwertsbreite	$\kappa(t_r)$	Ableitung der Zeit nach der retardierten Zeit
δ	Eindringtiefe beim Skineffekt, m	$\Lambda(T)$	Londonsche Konstante, Ωms
δ	Gangunterschied, m	λ	Wellenlänge in Materie, m
δ	Phasenverschiebung	λ_0	Vakuumwellenlänge, m
δ_L	Londonsche Eindringtiefe, m	λ_L	Leitungswellenlänge, m
δ_ε	dielektrischer Verlustwinkel	λ_c	Grenzwellenlänge im Hohlleiter, m
δ_n	Phasengang in Gruppenantennen	λ_{eff}	effektive Wellenlänge, m
$\delta(\mathbf{r})$	Diracsche Deltafunktion, $1/\text{m}^3$	μ	Permeabilität, Vs/(Am)
ε	numerische Exzentrizität	μ_0	magnet. Feldkonstante, Vs/(Am)
ε	Permittivität, As/(Vm)	μ_i	Eigenwerte im Doppelkonus
ε	Reflektortoleranzen, m	μ_r	relative Permeabilität eines materiellen Mediums
ε_0	elektr. Feldkonstante, As/(Vm)	$\mu_{r,\text{eff}}$	effektive, relative Permeabilität
ε_r	relative Permittivität eines materiellen Mediums	$\mu_{r,\text{Fe}}$	relative Permeabilität von Ferrit
$\varepsilon_{r,\text{eff}}$	effektive, relative Permittivität	ξ	Streufaktor einer Spule
ε_M	beam efficiency	π	Kreiskonstante
η	Antennenwirkungsgrad	r, ϑ, φ	Kugelkoordinaten
η	Integrationsvariable, 1/s	ρ, φ, z	Zylinderkoordinaten
η_B	Bandbreitenwirkungsgrad	ρ	elektr. Raumladungsdichte, C/m^3
η_P	Polarisationswirkungsgrad	ρ	Horn-tiefe, m
Θ_E	Halbwertsbreite in E-Ebene	ρ_M	magnet. Raumladungsdichte, Vs/m^3
Θ_H	Halbwertsbreite in H-Ebene	σ	Abstandsfaktor (LPDA)
$\Theta_{0,E}$	Nullwertsbreite in E-Ebene	σ'	mittlerer Abstandsfaktor (LPDA)
$\Theta_{0,H}$	Nullwertsbreite in H-Ebene	τ	Integrationsvariable
ϑ_0	Nullwertswinkel $\Theta_0/2$	τ	Polarisationswinkel
$\vartheta_{1/2}$	Halbwertswinkel $\Theta/2$	τ	Skalierungsfaktor (LPDA)
		Φ	magnetischer Fluss, $\text{Wb} = \text{Vs}$
		$\Phi(\mathbf{r})$	skalare Ortsfunktion, V oder A
		φ, ϕ	Winkel
		φ_S	Schwenkwinkel
		Ψ	elektrischer Fluss, As
		Ω	gesamter Raumwinkel, $\text{sr} = \text{rad}^2$
		Ω_M	Hauptkeulenraumwinkel, $\text{sr} = \text{rad}^2$
		ω	Kreisfrequenz, 1/s

Abkürzungen

AR	Achsenverhältnis (axial ratio)
EIRP	äquivalente isotrope Strahlungsleistung
ET	Randabfall (edge taper)
FDTD	Methode der Finiten Differenzen
FEM	Methode der Finiten Elemente
IEC	International Electrical Commission
GO	Geometrische Optik
LHC	left hand circular (Polarisation)
LPDA	logarithmisch-periodische Dipolantenne
PO	Physikalische Optik
RHC	right hand circular (Polarisation)
RL	return loss (Rückflussdämpfung)
SLL	Nebenkeulenniveau (side lobe level)
XP	Kreuzpolarisationsmaß

SI-Basiseinheiten

Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
elektr. Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

SI-verträgliche Einheiten

Ebener Winkel	Grad	°
Pegel	Bel	B
Pegel	Neper	Np

Metrische SI-Vielfache

10^{-24}	Yocto	y
10^{-21}	Zepto	z
10^{-18}	Atto	a
10^{-15}	Femto	f
10^{-12}	Piko	p
10^{-9}	Nano	n
10^{-6}	Mikro	μ
10^{-3}	Milli	m
10^{-2}	(Zenti)	c
10^{-1}	(Dezi)	d
10^1	(Deka)	da
10^2	(Hekto)	h
10^3	Kilo	k
10^6	Mega	M
10^9	Giga	G
10^{12}	Tera	T
10^{15}	Peta	P
10^{18}	Exa	E
10^{21}	Zetta	Z
10^{24}	Yotta	Y

Abgeleitete SI-Einheiten mit eigenen Symbolen

Kraft	Newton	$N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
Arbeit, Energie	Joule	$J = N \cdot \text{m} = W \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$
Leistung	Watt	$W = J/\text{s} = V \cdot A = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$
Druck	Pascal	$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2 = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$
Frequenz	Hertz	$\text{Hz} = 1/\text{s}$
elektr. Ladung	Coulomb	$C = A \cdot \text{s}$
elektr. Spannung	Volt	$V = J/C = \text{kg} \cdot \text{m}^2/(\text{A} \cdot \text{s}^3)$
elektr. Widerstand	Ohm	$\Omega = V/A = \text{kg} \cdot \text{m}^2/(\text{A}^2 \cdot \text{s}^3)$
elektr. Leitwert	Siemens	$S = A/V = \text{A}^2 \cdot \text{s}^3/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
elektr. Kapazität	Farad	$F = C/V = \text{A}^2 \cdot \text{s}^4/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
magn. Flussdichte	Tesla	$T = V \cdot \text{s}/\text{m}^2 = \text{kg}/(\text{A} \cdot \text{s}^2)$
magn. Fluss	Weber	$\text{Wb} = V \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/(\text{A} \cdot \text{s}^2)$
Induktivität	Henry	$H = V \cdot \text{s}/A = \text{kg} \cdot \text{m}^2/(\text{A}^2 \cdot \text{s}^2)$
ebener Winkel	Radian	rad
Raumwinkel	Steradian	sr