

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 13 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 neuer benutzerfreundlicher **Anhang** stellt wichtige Formeln kompakt zusammen und erleichtert das Nachschlagen häufig gebrauchter Ergebnisse.

Viele durch Computersimulationen berechnete Felddbilder 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 253 Abbildungen und 79 Tabellen wesentlich beitragen.

In der komplett überarbeiteten **zweiten 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. Neben einem neuen Anhang wichtiger Formeln wurden mit der Luneburg-Linse und dem Stielstrahler zwei dielektrische Antennen zusätzlich in den Text mit aufgenommen.

Weitere **Neuerungen** sind: Vektoranalysis in beliebigen krummlinigen orthogonalen Koordinatensystemen, Materialgleichungen für bewegte Medien, Dispersion in Hohlleitern, Erweiterung der IEC-Hohlleitertabellen, Tabellen der ersten Nullstellen von Bessel- und Neumannfunktionen, Steghohlleiter (ridge waveguide), Güteberechnung bei Hohlraumresonatoren, Verwendung von Schaltzeichen nach DIN-Norm, verbesserter Entwurf von logarithmisch-periodischen Dipolantennen, erweiterte Aperturmodelle bei Flächenstrahlern, verbesserte Designformeln für Hornantennen sowie eine Liste englischer Übersetzungen wichtiger Fachbegriffe.

Das Sachwortverzeichnis wurde auf Wunsch vieler Leser um mehr als die Hälfte erweitert. Mit nun 125 anwendungsbezogenen Übungsaufgaben (mehrheitlich mit vollständigen Lösungen) hat sich deren Anzahl fast verdoppelt, wodurch eine noch bessere Vertiefung ermöglicht wird. Bei weiterführenden Problemen helfen jetzt 214 Literaturangaben – 58 mehr als bei der ersten Auflage, da in den vergangenen drei Jahren viele neue Veröffentlichungen hinzugekommen sind. In 68 Kurzbiografien werden bahnbrechende Arbeiten bekannter Wissenschaftler gewürdigt, die maßgeblich zur Entwicklung der Elektrodynamik und der Antennentechnik beigetragen haben.

Ich danke dem Verlag Vieweg für die sehr gute Zusammenarbeit und dafür, dass auf meine Änderungs- und Ergänzungswünsche für die vorliegende zweite 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 Auflage durch die Leserschaft sehr gefreut. Ein ausdrücklicher Dank gilt wieder meiner lieben Frau, Elisabeth Höbner-Kark, die meine Bemühungen um die umfangreiche Überarbeitung der ersten Auflage in jeder Weise unterstützt hat. Schließlich widme ich dieses Buch meinen guten Eltern, Willi und Anneliese Kark, denen ich großen Dank für ihre stete Förderung und Unterstützung schulde.

Bad Wurzach, im Oktober 2006

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	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.....	221
9.2 Magnetischer Elementarstrahler	225
9.3 Kreisförmige Rahmenantenne beliebigen Umfangs	227
9.3.1 Vektorpotenzial eines kreisförmigen Ringstroms.....	228
9.3.2 Kreisförmige Rahmenantenne mit Umfang $U = n \lambda_0$	231
9.3.3 Erweiterung auf beliebigen Umfang.....	233
9.4 Übungen	239
10 Lineare Antennen	240
10.1 Zylinderantenne.....	241
10.2 Dünne Linearantenne.....	242
10.2.1 Strahlungsfelder	242
10.2.2 Wanderwellenantenne (Langdrahtantenne)	251
10.2.3 Strahlungswiderstand	254
10.2.4 Verkürzungsfaktor.....	261
10.2.5 Richtfaktor und Gewinn	264
10.3 Übungen	267
11 Gruppenantennen	268
11.1 Gruppenfaktor bei räumlicher Anordnung	270
11.2 Lineare Gruppen.....	271
11.2.1 Gruppencharakteristik.....	271

11.2.2	Querstrahler.....	276
11.2.3	Längsstrahler.....	278
11.2.4	Richtfaktor linearer Gruppen.....	282
11.2.5	Kreuzdipol.....	285
11.2.6	Yagi-Uda-Antenne.....	286
11.2.7	Phasengesteuerte Gruppenantennen.....	288
11.2.8	Inhomogene Amplitudenbelegung.....	290
11.2.9	Verdünnte Gruppen.....	294
11.3	Ebene Gruppen.....	297
11.4	Antennen über Erde.....	298
11.5	Strahlungskopplung in ebenen Dipolgruppen.....	305
11.6	Übungen.....	307
12	Breitbandantennen.....	308
12.1	Doppelkonusantenne.....	308
12.1.1	Unendlich lange symmetrische Doppelkonusleitung.....	309
12.1.2	Symmetrische Doppelkonusantenne endlicher Länge.....	310
12.1.3	Näherungslösung bei kleinem Reflexionsfaktor.....	317
12.1.4	Doppelkonusantenne mit optimiertem Gewinn.....	322
12.2	Logarithmisch-periodische Antenne.....	323
12.3	Spiral- und Fraktalantennen.....	327
12.4	Übungen.....	328
13	Aperturstrahler I (Hohlleiterantennen).....	329
13.1	Prinzipien der Aperturstrahler.....	329
13.2	Ebene Apertur im freien Raum (Chu-Modell).....	331
13.3	Ebene Apertur im unendlichen ebenen Schirm (E-Feld-Modell).....	337
13.3.1	Hohlleiterstrahler.....	338
13.3.2	Richtfaktor und Flächenwirkungsgrad.....	343
13.4	Übungen.....	345
14	Aperturstrahler II (Hornantennen).....	346
14.1	Bauformen.....	346
14.2	Sektorhorn.....	346
14.3	Pyramidenhorn.....	350
14.4	Kegelhorn und Rillenhorn.....	356
14.4.1	Phasenfehler in der ebenen Hornapertur.....	356
14.4.2	Berechnungsverfahren.....	357
14.4.3	Optimale Bauweise.....	359
14.5	Übungen.....	360
15	Aperturstrahler III (Linsenantennen).....	361
15.1	Konvexe Verzögerungslinse.....	361
15.2	Konkave Beschleunigungslinse.....	364
15.3	Luneburg-Linse.....	365
15.4	Übungen.....	366
16	Aperturstrahler IV (Reflektorantennen).....	367
16.1	Bauformen.....	367

16.2 Mehrspiegelantennen.....	370
16.3 Entwurf einer Cassegrain-Antenne	371
16.4 Gewinn von Reflektorantennen	375
16.5 Fehler der Oberflächenkontur.....	376
16.6 Amplitudenbelegung einer kreisförmigen Apertur	380
16.7 Übungen	383
17 Spezielle Antennenformen	384
17.1 Streifenleitungsantenne	384
17.1.1 Grundlegende Entwurfsrichtlinien	384
17.1.2 Strahlungsfelder nach dem Cavity-Modell.....	387
17.1.3 Gruppenantennen in Streifenleitungstechnik.....	391
17.2 Schlitzantenne	393
17.3 Wendel- oder Helixantenne	397
17.4 Dielektrische Oberflächenwellenantenne	400
17.5 Übungen	401
Anhang	402
A Mathematische Formeln	402
A.1 Konstanten.....	402
A.2 Trigonometrische Beziehungen.....	402
A.3 Reihenentwicklungen für kleine Argumente	402
A.4 Asymptotische Darstellungen für große Argumente.....	403
A.5 Beziehungen zwischen Besselfunktionen.....	403
A.6 Nützliche Integrale	403
A.7 Lommelsche Funktionen mit einem Index und zwei Argumenten.....	404
A.8 Krummlinige orthogonale Koordinatensysteme	405
B Elektrotechnische Formeln	406
B.1 Abkürzungen	406
B.2 Grundgleichungen	406
B.3 Vektorpotenziale	406
B.4 Feldgrößen.....	406
B.5 Verschiedenes.....	406
C Formeln zum Antennendesign	407
C.1 Schlanke Dipolantennen im Freiraum mit Mittelpunktspeisung	407
C.2 Gruppencharakteristik linearer Antennengruppen	407
C.3 Strahlung einer linearen Belegung bzw. einer Rechteckapertur	408
C.4 Strahlung einer Kreisapertur.....	408
C.5 Ausbreitungskonstanten von Hohlleiterwellen	408
C.6 Hornstrahler mit Maximalgewinn bei fester Baulänge	409
C.7 Beam efficiency und pattern factor elektrisch großer Antennen.....	409
Englische Übersetzungen wichtiger Fachbegriffe	410
Literaturverzeichnis	411
Sachwortverzeichnis	418
Personenverzeichnis.....	424

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
∂	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
\sphericalangle	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{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{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
$\underline{\mathbf{p}}_V$	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 bei Wendelantennen, 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}	Maximalstrom, A
D_R	Richtfaktor des Rillenhorns	\underline{I}_0	Speisestrom, A
d	Innendurchmesser, Drahtdicke, m	$J_m(x)$	Besselfunktion
\underline{d}	Durchlassfaktor	$J_m(x)$	Ableitung nach dem Argument
dV	Volumenelement, m ³	$\hat{J}_{\mu_i}(x)$	Riccati-Besselfunktion
\hat{E}	reelle Amplitude, V/m	j	imaginäre Einheit = $\sqrt{-1}$
\underline{E}_0	komplexe Amplitude, V/m	j_{mn}	n-te Nullstelle von J_m
$\underline{E}_{\text{co}}$	kopolare Feldstärke, V/m	j_{mn}	n-te Nullstelle von J_m
\underline{E}_d	Durchbruchfeldstärke, V/m	K	Eigenwert im Rundhohlleiter, 1/m
$\underline{E}_{\text{xp}}$	kreuzpolare Feldstärke, V/m	$K_{E,H}$	Korrekturfaktoren im Sektorhorn
e	elektrische Elementarladung, C	k	Boltzmann-Konstante, J/K
e	lineare Exzentrizität	k	Wellenzahl in Materie, 1/m
		k_0	Wellenzahl im Vakuum, 1/m

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	$\text{si}(x)$	si-Funktion
m	Masse, kg	T	absolute Temperatur, K
m_e	Elektronenmasse, kg	T_C	Sprungtemperatur, K
N	Anzahl der Gruppenelemente	t	Zeitvariable, s
N	Windungsanzahl	t_r	retardierte Zeitvariable, s
N	Normierungsfaktor	U	Umfang, m
$N_m(x)$	Neumannfunktion	\underline{U}_0	Speisespannung, V
$N'_m(x)$	Ableitung nach dem Argument	$U_n(w, z)$	Lommelsche Funktion
n	Modenindex	u	elektrische Spannung, V
n	Brechungsindex	u_m	magnetische Spannung, A
n_{m_n}	n-te Nullstelle von N_m	V	Verkürzungsfaktor
n_{m_n}	n-te Nullstelle von N'_m	v	Geschwindigkeit, m/s
P	Beobachterpunkt	v_E	Energiegeschwindigkeit, m/s
P	Wirkleistung, W	v_F	Frontgeschwindigkeit, m/s
P_E	Eingangsleistung, 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
R_V	Verlustwiderstand, 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	Dämpfungskonstante, 1/m
α	Hornöffnungswinkel
α	Steigungswinkel (LPDA)
β	Phasenkonstante, 1/m
β	normierte Geschwindigkeit v/c_0
β	zeitliche Ableitung, 1/s
$\Gamma(x)$	Gammafunktion
$\underline{\gamma}$	Ausbreitungskonstante, 1/m
$\bar{\gamma}(\beta)$	relativistischer Parameter
$\Delta\vartheta$	Halbwertsbreite (3-dB-Breite)
$\Delta\vartheta_0$	Nullwertsbreite
$\Delta\varphi$	Halbwertsbreite (3-dB-Breite)
$\Delta\varphi_0$	Nullwertsbreite
δ	Eindringtiefe beim Skineffekt, m
δ	Gangunterschied, m
δ	Phasenverschiebung
δ_L	Londonsche Eindringtiefe, m
δ_ε	dielektrischer Verlustwinkel
δ_n	Phasengang in Gruppenantennen
$\delta(\mathbf{r})$	Diracsche Deltafunktion, $1/m^3$
ε	numerische Exzentrizität
ε	Permittivität, As/(Vm)
ε	Reflektortoleranzen, m
ε_0	elektr. Feldkonstante, As/(Vm)
ε_r	relative Permittivität eines materiellen Mediums
$\varepsilon_{r,eff}$	effektive, relative Permittivität
ε_M	beam efficiency
η	Antennenwirkungsgrad
η	Integrationsvariable, 1/s
η_B	Bandbreitenwirkungsgrad
η_P	Polarisationswirkungsgrad
Θ_E	Halbwertsbreite in E-Ebene
Θ_H	Halbwertsbreite in H-Ebene
$\Theta_{0,E}$	Nullwertsbreite in E-Ebene
$\Theta_{0,H}$	Nullwertsbreite in H-Ebene
ϑ_0	Nullwertswinkel $\Theta_0/2$
$\vartheta_{1/2}$	Halbwertswinkel $\Theta/2$
θ	Winkel

θ_B	Brewster-Winkel
θ_c	Grenzwinkel der Totalreflexion
θ_i	Einfallswinkel
θ_m	Hauptreflektorwinkel
θ_r	Reflexionswinkel
θ_s	Subreflektorwinkel
θ_t	Brechungswinkel
κ	Korrekturfaktor (Reflektorantenne)
κ	elektrische Leitfähigkeit, S/m
κ_n	normale Leitfähigkeit, S/m
κ_s	Supraleitfähigkeit, S/m
$\kappa(t_r)$	Ableitung der Zeit nach der retardierten Zeit
$\Lambda(T)$	Londonsche Konstante, Ωms
λ	Wellenlänge in Materie, m
λ_0	Vakuumwellenlänge, m
λ_L	Leitungswellenlänge, m
λ_c	Grenzwellenlänge im Hohlleiter, m
λ_{eff}	effektive Wellenlänge, m
μ	Permeabilität, Vs/(Am)
μ_0	magnet. Feldkonstante, Vs/(Am)
μ_{Fe}	Permeabilität von Ferrit, Vs/(Am)
μ_{eff}	effektive Permeabilität, Vs/(Am)
μ_i	Eigenwerte im Doppelkonus
μ_r	relative Permeabilität eines materiellen Mediums
ξ	Streufaktor einer Spule
π	Kreiskonstante
r, ϑ, φ	Kugelkoordinaten
ρ, φ, z	Zylinderkoordinaten
ρ	elektr. Raumladungsdichte, C/m^3
ρ	Horntiefe, m
ρ_M	magnet. Raumladungsdichte, Vs/ m^3
σ	Abstandsfaktor (LPDA)
σ'	mittlerer Abstandsfaktor (LPDA)
τ	Integrationsvariable
τ	Polarisationswinkel
τ	Skalierungsfaktor (LPDA)
Φ	magnetischer Fluss, $Wb = Vs$
$\Phi(\mathbf{r})$	skalare Ortsfunktion, V oder A
φ, ϕ	Winkel
φ_S	Schwenkwinkel
Ψ	elektrischer Fluss, As
Ω	gesamter Raumwinkel, $sr = \text{rad}^2$
Ω_M	Hauptkeulenraumwinkel, $sr = \text{rad}^2$
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)	
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	$\text{Pa} = N/\text{m}^2 = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$
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