

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 18 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 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 266 Abbildungen und 84 Tabellen wesentlich beitragen.

In der komplett überarbeiteten **vierten 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 dritten Auflage hervorzuheben: stark erweiterte Behandlung von Linsenantennen und Streifenleitungsantennen, verbesserte Designformeln für Doppelkonusantennen, neue Tabelle zu elektrischen Eigenschaften ausgewählter Materialien und Erweiterung der Übersetzungstabelle wichtiger Fachbegriffe. Klassische Entwurfsformeln für die genannten Antennenformen wurden durch **numerische Simulationen** mit modernen 3D-Gitterverfahren nochmals überprüft und konnten in ihrer Genauigkeit gesteigert werden.

Mit 128 anwendungsbezogenen Übungsaufgaben (mehrheitlich mit vollständigen Lösungen) wird eine noch bessere Vertiefung ermöglicht. Bei weiterführenden Problemen helfen jetzt 249 Literaturangaben – wieder mehr als bei der vorherigen Auflage, da in den vergangenen zwei Jahren viele neue Veröffentlichungen hinzugekommen sind. In 70 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 vierte 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 drei Auflagen durch die Leserschaft sehr gefreut. Ein ausdrücklicher Dank gilt wieder meiner lieben Frau, Elisabeth Höbner-Kark, die meine Bemühungen um die umfangreiche Überarbeitung der dritten Auflage in jeder Weise unterstützt hat.

Bad Wurzach, im Juli 2011

Klaus W. Kark

E-Mail: kark@hs-weingarten.de

Internet: <http://portal.hs-weingarten.de/web/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 | 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 |
| 3 Grundlagen der Elektrodynamik | 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 |

| | |
|---|-----|
| 4 Ebene Wellen | 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 Telegraf- und Helmholtz-Gleichung..... | 75 |
| 4.4 Leistungstransport | 79 |
| 4.5 Übungen | 81 |
| 5 Ausbreitungseffekte | 82 |
| 5.1 Polarisation..... | 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 |
| 6 Wellenleiter | 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 |

| | |
|---|-----|
| 7 Grundbegriffe der Antennentechnik | 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 Polarisierung..... | 173 |
| 7.4 Übungen..... | 175 |
| 8 Grundbegriffe von Strahlungsfeldern | 176 |
| 8.1 Grundgleichungen..... | 176 |
| 8.2 Potenziellösung 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 Kopolarisierung und Kreuzpolarisierung..... | 211 |
| 8.8 Übungen..... | 214 |
| 9 Elementardipole und Rahmenantennen | 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 |

| | |
|--|-----|
| 10 Lineare Antennen | 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 |
| 11 Gruppenantennen | 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 |
| 12 Breitbandantennen | 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 |
| 13 Aperturstrahler I (Hohlleiterantennen) | 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 |

| | |
|--|-----|
| 14 Aperturstrahler II (Hornantennen) | 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 |
| 15 Aperturstrahler III (Linsenantennen) | 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 |
| 16 Aperturstrahler IV (Reflektorantennen) | 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 |
| 17 Spezielle Antennenformen | 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 |

| | |
|--|-----|
| Anhang | 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 |

Formelzeichen und Abkürzungen

Naturkonstanten

| | |
|--------------|--|
| c_0 | $2,997\,924\,58 \cdot 10^8$ 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 | $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 376,73 \Omega$ |
| h | $6,626\,068\,96 \cdot 10^{-34}$ Js |
| k | $1,380\,650\,4 \cdot 10^{-23}$ J/K |
| e | $1,602\,176\,487 \cdot 10^{-19}$ C |
| m_e | $9,109\,382\,6 \cdot 10^{-31}$ kg |

Allgemeines

| | |
|--------------------------------|---|
| \underline{A} | komplexe Amplitude |
| $\text{Im}\{\underline{A}\}$ | Imaginärteil |
| $\text{Re}\{\underline{A}\}$ | Realteil |
| \mathbf{A} | Vektor |
| $ \mathbf{A} = A$ | Betrag eines Vektors |
| A_i | Vektorkomponente |
| A_n, A_t | normale, tangentielle Komponente |
| $A_{ }$ | parallele Komponente |
| A_{\perp} | senkrechte Komponente |
| $\underline{\underline{A}}$ | komplexer Vektor |
| $\underline{\underline{A}}^*$ | konjugiert komplexer Vektor |
| $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ | Skalarprodukt |
| $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ | Vektorprodukt |
| $[\mathbf{A}]$ | Matrix |
| $[\mathbf{A}]^{-1}$ | inverse Matrix |
| $\epsilon * \mathbf{E}$ | Faltungsintegral $\int \epsilon(\tau) \mathbf{E}(t - \tau) d\tau$ |
| ∂ | 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 |

| | |
|-------------------|---------------------------|
| \sphericalangle | Winkel |
| $=$ | gleich |
| \equiv | identisch gleich |
| \approx | ungefähr gleich |
| $\hat{=}$ | entspricht |
| \propto | proportional |
| ∞ | unendlich |
| \oint, \oiint | Kontur- und Hüllintegrale |

Vektoren

| | |
|-------------------------------|--|
| $\underline{\underline{A}}$ | 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 |
| $d\mathbf{r}, d\mathbf{s}$ | Wegelement, m |
| \mathbf{E} | elektrische Feldstärke, V/m |
| $\underline{\underline{E}}_A$ | elektrische Aperturfeldstärke, V/m |
| \mathbf{e}_i | Einheitsvektor |
| \mathbf{F} | Kraft, N |
| $\underline{\underline{F}}$ | elektrisches Vektorpotenzial, V |
| \mathbf{H} | magnetische Feldstärke, A/m |
| $\underline{\underline{H}}_A$ | 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 |
| $\underline{\underline{m}}$ | magnetisches Dipolmoment, Am^2 |
| \mathbf{n} | normaler Einheitsvektor |
| $\underline{\underline{P}}$ | E-Feld-Aperturintegral, Vm |
| $\underline{\underline{p}}$ | elektrisches Dipolmoment, Cm |
| $\underline{\underline{p}}$ | Impuls, Ns |
| $\underline{\underline{p}}_V$ | Impulsdichte, Ns/m^3 |
| $\underline{\underline{Q}}$ | H-Feld-Aperturintegral, Am |
| $\underline{\underline{R}}$ | Abstandsvektor, m |
| \mathbf{r} | Ortsvektor zum Beobachter, m |
| \mathbf{r}' | Ortsvektor zum Quellpunkt, m |
| $\underline{\underline{S}}$ | komplexer Poyntingvektor, W/m^2 |
| $\underline{\underline{S}}_R$ | 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 |
| A_W | Wirkfläche, m ² |
| A_{geo} | geometrische Aperturfläche, m ² |
| a | Längenabmessung, m |
| a_N | Nebenkeulendämpfung, dB |
| \underline{a}_n | Wellenamplitude |
| B | Aperturabmessung, m |
| B | Bandbreite f_o/f_u |
| B_E | Eingangssuszeptanz, S |
| B_r | relative Bandbreite $(f_o - f_u)/f_m$ |
| B_s | Strukturbandbreite (LPDA) |
| b | Längenabmessung, m |
| $\underline{b}_i, \underline{b}_n$ | Wellenamplituden |
| C | Kapazität, F |
| $C = \ln \gamma$ | Eulersche Konstante |
| $C(\vartheta, \varphi)$ | Richtcharakteristik |
| C_E | Elementcharakteristik |
| C_{Gr} | Gruppencharakteristik |
| $C_{\text{Gr}}^H(\varphi)$ | Horizontalschnitt von C_{Gr} |
| $C_H(\varphi)$ | horizontales Richtdiagramm |
| $C_V(\vartheta)$ | vertikales Richtdiagramm |
| C_{co} | kopolare Richtcharakteristik |
| C_{xp} | kreuzpolare Richtcharakteristik |
| $C(x)$ | Fresnelsches Integral |
| $\text{Ci}(x)$ | Integralkosinus |
| c | Lichtgeschwindigkeit, m/s |
| c_0 | Vakuumlichtgeschwindigkeit, m/s |
| D | Durchmesser einer Apertur, m |
| D | Richtfaktor (Direktivität) |
| $D(\vartheta, \varphi)$ | richtungsabhängiger Richtfaktor |
| D_E | Richtfaktor des E-Sektorhorns |
| D_H | Richtfaktor des H-Sektorhorns |
| D_K | Richtfaktor des Kegelhorns |
| D_P | Richtfaktor des Pyramidenhorns |
| D_R | Richtfaktor des Rillenhorns |
| d | Durchmesser, Dicke, m |
| \underline{d} | Durchlassfaktor |
| dV | Volumenelement, m ³ |
| \hat{E} | reelle Amplitude, V/m |
| \underline{E}_0 | komplexe Amplitude, V/m |
| $\underline{E}_{\text{co}}$ | kopolare Feldstärke, V/m |

| | |
|--|--|
| E_d | Durchbruchfeldstärke, V/m |
| $\underline{E}_{\text{xp}}$ | kreuzpolare Feldstärke, V/m |
| e | elektrische Elementarladung, C |
| e | lineare Exzentrizität |
| F | Brennweite, m |
| \underline{F} | Gruppenfaktor bei Patch-Antennen |
| $\underline{F}(x)$ | Fresnelsches Integral |
| F_{eff} | effektive Brennweite, m |
| $\underline{F}_{\text{Gr}}$ | Gruppenfaktor |
| f | Frequenz, Hz |
| $f(x)$ | Separationsfunktion |
| $f_{1,2}$ | Brennweiten, m |
| f_c | Grenzfrequenz im Hohlleiter, Hz |
| f_e | Empfangsfrequenz, Hz |
| f_m | Frequenzbandmitte $(f_o + f_u)/2$, Hz |
| f_o | obere Frequenzbandgrenze, Hz |
| f_R | Resonanzfrequenz, Hz |
| f_s | Sendefrequenz, Hz |
| f_u | untere Frequenzbandgrenze, Hz |
| G | Gewinn über Kugelstrahler |
| G | elektrischer Leitwert, S |
| \underline{G} | Gruppenfaktor bei Patch-Antennen |
| \underline{G}_D | Gewinn über Halbwellendipol |
| G_E | Eingangsleitwert, S |
| G_H | Gewinn über Hertzschen Dipol |
| G_S | Gesamtstrahlungsleitwert, S |
| G_n | Strahlungsleitwert <u>eines</u> non-radiating slots, S |
| G_r | Strahlungsleitwert <u>eines</u> radiating slots, S |
| $G_r^{(s)}$ | Selbstleitwert <u>eines</u> radiating slots, S |
| $G_r^{(k)}$ | Koppelleitwert <u>eines</u> radiating slots, S |
| $\underline{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ | Greensche Funktion, 1/m |
| g | Ganghöhe bzw. Speisespalt, m |
| g | logarithmierter Gewinn in dBi |
| g_d | logarithmierter Gewinn in dBd |
| $g(y)$ | Separationsfunktion |
| H, h_E | Höhe über Erde, m |
| $\hat{H}_n^{(2)}(x)$ | Riccati-Hankelfunktion |
| h | Längenabmessung, Substrathöhe, m |
| h | Plancksche Konstante, Js |
| h_i | Metrikoeffizient |
| \hbar | $h/(2\pi) \approx 1,05457 \cdot 10^{-34}$ Js |
| Δh | elektrische Verlängerung, m |

| | | | |
|------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| I, i | elektrischer Strom, A | p_s | Strahlungsdruck, Pa |
| \hat{I} | Stromamplitude, A | Q | Blindleistung, VA, Resonatorgüte |
| \underline{I}_0 | Speisestrom, A | $Q(\rho)$ | Aperturbelegung |
| \underline{I}_{\max} | Maximalstrom, A | Q, q | elektrische Ladungsmenge, C |
| $J_m(x)$ | Besselfunktion | $Q_{\mu_i}(x)$ | Kugelfunktion zweiter Art |
| $J'_m(x)$ | Ableitung nach dem Argument | q | Flächenwirkungsgrad |
| $\hat{J}_{\mu_i}(x)$ | Riccati-Besselfunktion | q_m | magnetische Ladungsmenge, Vs |
| j | imaginäre Einheit = $\sqrt{-1}$ | R | Abstand, m |
| j_{mn} | n-te Nullstelle von J_m | R | elektrischer Widerstand, Ω |
| j_{mn} | n-te Nullstelle von J'_m | R | Krümmungsradius, m |
| K | Eigenwert im Rundhohlleiter, 1/m | R | Reflexionskoeffizient |
| $K_{E,H}$ | Korrekturfaktoren im Sektorhorn | R_0 | Gleichstromwiderstand, Ω |
| k | Boltzmann-Konstante, J/K | R_E | Eingangswiderstand, Ω |
| k | Wellenzahl in Materie, 1/m | R_S | Strahlungswiderstand, Ω |
| 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 | \underline{S}_{ij} | Streuparameter |
| m | Modenindex bzw. Masse, kg | \underline{S}_{11} | Reflexionsfaktor |
| m_e | Elektronenmasse, kg | \underline{S}_{21} | Transmissionsfaktor |
| N | Anzahl der Gruppenelemente | s | Schlankheitsgrad |
| N | Windungszahl | $\text{si}(x)$ | si-Funktion |
| N | Normierungsfaktor | T | absolute Temperatur, K |
| $N_m(x)$ | Neumannfunktion | T_C | Sprungtemperatur, K |
| $N'_m(x)$ | Ableitung nach dem Argument | t | Zeitvariable, s |
| n | Modenindex | t_r | retardierte Zeitvariable, s |
| n | Brechungsindex $\sqrt{\epsilon_r}$ | U | Umfang, m |
| n_{mn} | n-te Nullstelle von N_m | \underline{U}_0 | Speisespannung, V |
| n_{mn} | n-te Nullstelle von N'_m | $U_n(w, z)$ | Lommelsche Funktion |
| P | Beobachterpunkt | u | elektrische Spannung, V |
| P | Wirkleistung, W | u_m | magnetische Spannung, A |
| P_E | Empfangsleistung, W | V | Verkürzungsfaktor |
| P_G | Generatorleistung, W | v | Geschwindigkeit, m/s |
| P_S | Strahlungsleistung, W | v_E | Energiegeschwindigkeit, m/s |
| P_V | Verlustleistung, W | v_F | Frontgeschwindigkeit, m/s |
| $P_n(x)$ | Legendre-Polynom | v_g | Gruppengeschwindigkeit, m/s |
| $P_{\mu_i}(x)$ | Kugelfunktion erster Art | v_p | Phasengeschwindigkeit, m/s |
| p | Modenindex | W | Patchbreite, m |
| | | w | Gesamtenergiedichte, J/m ³ |

| | | | |
|----------------------|---|------------------------------|--|
| w_e | elektrische Energiedichte, J/m^3 | ε | numerische Exzentrizität |
| w_m | magnetische Energiedichte, J/m^3 | ε | Permittivität, $\text{As}/(\text{Vm})$ |
| X | Reaktanz, Ω | ε | Reflektortoleranzen, m |
| X_E | Eingangsreaktanz, Ω | ε_0 | elektr. Feldkonstante, $\text{As}/(\text{Vm})$ |
| X_S | Strahlungsreaktanz, Ω | ε_r | relative Permittivität eines materiellen Mediums |
| X_{nm} | Kopplungsreaktanz, Ω | | |
| x, y, z | kartesische Koordinaten, m | $\varepsilon_{r,\text{eff}}$ | effektive, relative Permittivität |
| x_s | Speisepunkt, m | ε_M | beam efficiency |
| \underline{Y} | Admittanz, S | η | Antennenwirkungsgrad |
| \underline{Y}_A | Abschlussadmittanz, S | η | Integrationsvariable, 1/s |
| \underline{Y}_A | Aperturadmittanz, S | η_B | Bandbreitenwirkungsgrad |
| \underline{Y}_E | Eingangsadmittanz, S | η_P | Polarisationswirkungsgrad |
| y_s | Speisepunkt, m | Θ_E | Halbwertsbreite in E-Ebene |
| \underline{Z} | Impedanz, Ω | Θ_H | Halbwertsbreite in H-Ebene |
| \underline{Z}_A | Abschlussimpedanz, Ω | $\Theta_{0,E}$ | Nullwertsbreite in E-Ebene |
| \underline{Z}_A | Aperturimpedanz, Ω | $\Theta_{0,H}$ | Nullwertsbreite in H-Ebene |
| \underline{Z}_E | Eingangsimpedanz, Ω | ϑ_0 | Nullwertswinkel $\Theta_0/2$ |
| \underline{Z}_F | Feldwellenimpedanz, Ω | $\vartheta_{1/2}$ | Halbwertswinkel $\Theta/2$ |
| \underline{Z}_L | Leitungswellenimpedanz, Ω | θ | Winkel |
| \underline{Z}_S | Strahlungsimpedanz, Ω | θ_B | Brewster-Winkel |
| \underline{Z}_{nm} | Kopplungsimpedanz, Ω | θ_c | Grenzwinkel der Totalreflexion |
| Z_0 | Feldwellenwiderstand des freien Raums, Ω | 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, $\text{Vs}/(\text{Am})$ |
| | | μ_0 | magnet. Feldkonstante, $\text{Vs}/(\text{Am})$ |
| | | μ_i | Eigenwerte im Doppelkonus |
| | | μ_r | relative Permeabilität eines materiellen Mediums |
| | | $\mu_{r,\text{eff}}$ | effektive, relative Permeabilität |
| | | $\mu_{r,\text{Fe}}$ | relative Permeabilität von Ferrit |
| | | ξ | Streufaktor einer Spule |
| | | π | Kreiskonstante |

Griechische Buchstaben

| | |
|----------------------|---|
| α | Dämpfungskonstante, 1/m |
| α | Hornsteigungswinkel |
| α | Steigungswinkel (LPDA) |
| β | Phasenkonstante, 1/m |
| β | normierte Geschwindigkeit v/c_0 |
| $\dot{\beta}$ | zeitliche Ableitung, 1/s |
| $\Gamma(x)$ | Gammafunktion |
| $\underline{\gamma}$ | Ausbreitungskonstante, 1/m |
| $\bar{\gamma}$ | Linsenrandwinkel |
| $\gamma(\beta)$ | 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, $1/\text{m}^3$ |

| | |
|-------------------------|--|
| 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 |
| ψ | Hornöffnungswinkel 2α |
| Ω | gesamter Raumwinkel, sr = rad ² |
| Ω_M | Hauptkeulenraumwinkel, sr = rad ² |
| ω | Kreisfrequenz, 1/s |

Abkürzungen

| | |
|------|--|
| AR | Achsenverhältnis: <u>A</u> xial <u>R</u> atio |
| EIRP | Äquivalente isotrope Strahlungsleistung |
| ET | Randabfall: <u>E</u> dge <u>T</u> aper |
| FDTD | Methode der <u>F</u> initen <u>D</u> ifferenzen |
| FEM | <u>M</u> ethode der <u>F</u> initen <u>E</u> lemente |
| GTD | <u>G</u> eometrical <u>T</u> heory of <u>D</u> iffraction |
| IEC | <u>I</u> nternational <u>E</u> lectrical <u>C</u> ommission |
| IL | Einfügungsdämpfung: <u>I</u> nsertion <u>L</u> oss |
| GO | <u>G</u> eometrische <u>O</u> ptik |
| LHC | <u>L</u> eft <u>H</u> and <u>C</u> ircular (Polarisation) |
| LPDA | <u>L</u> ogarithmisch-periodische <u>D</u> ipol- <u>a</u> ntenne |
| PO | <u>P</u> hysikalische <u>O</u> ptik |
| RHC | <u>R</u> ight <u>H</u> and <u>C</u> ircular (Polarisation) |
| RL | Rückflussdämpfung: <u>R</u> eturn <u>L</u> oss |
| SLL | Nebenkeulenniveau: <u>S</u> ide <u>L</u> obe <u>L</u> evel |
| SLS | <u>S</u> ide <u>L</u> obe <u>S</u> uppression = -SLL |
| 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 |