

# Inhaltsverzeichnis

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| <b>1 Einleitung</b>                             | 1  |
| 1.1 Frequenzbereiche                            | 1  |
| 1.2 Elektromagnetische Grundgrößen              | 2  |
| 1.3 Antennen und Strahlungsfelder im Überblick  | 4  |
| <b>2 Mathematische Grundlagen</b>               | 8  |
| 2.1 Vektoralgebra                               | 8  |
| 2.1.1 Skalarprodukt                             | 9  |
| 2.1.2 Vektorprodukt                             | 10 |
| 2.1.3 Spatprodukt                               | 11 |
| 2.2 Vektoranalysis                              | 13 |
| 2.2.1 Differenziation von skalaren Feldern      | 13 |
| 2.2.2 Differenziation von Vektorfeldern         | 16 |
| 2.2.3 Rechnen mit dem Nabla-Operator            | 20 |
| 2.2.4 Integralsätze der Vektoranalysis          | 23 |
| 2.2.5 Helmholtzsches Theorem                    | 27 |
| 2.3 Koordinatensysteme                          | 28 |
| 2.4 Aufgaben                                    | 30 |
| <b>3 Grundlagen der Elektrodynamik</b>          | 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 Aufgaben                                    | 51 |
| <b>4 Ebene Wellen</b>                           | 52 |
| 4.1 Ebene Wellen im Dielektrikum                | 52 |
| 4.1.1 Lösung der Helmholtz-Gleichung            | 52 |
| 4.1.2 Dämpfung und Eindringtiefe                | 56 |
| 4.1.3 Geschwindigkeitsdefinitionen              | 58 |
| 4.2 Ebene Wellen im Leiter                      | 63 |
| 4.2.1 Skineffekt                                | 63 |
| 4.2.2 EMV-Abschirmbleche                        | 65 |
| 4.2.3 Verlustlose Bandleitung                   | 66 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.4 Bandleitung mit Verlusten.....                          | 67  |
| 4.2.5 Wandimpedanz-Modell.....                                | 70  |
| 4.2.6 Kreiszylindrischer Draht .....                          | 74  |
| 4.3 Ebene Wellen im Supraleiter.....                          | 84  |
| 4.3.1 Londonsche Gleichungen .....                            | 85  |
| 4.3.2 Telegraf- und Helmholtz-Gleichung.....                  | 86  |
| 4.4 Leistungstransport .....                                  | 90  |
| 4.5 Aufgaben .....                                            | 92  |
| <b>5 Reflexion und Brechung I (Grundlagen)</b> .....          | 93  |
| 5.1 Polarisation.....                                         | 93  |
| 5.2 Senkrechter Einfall auf eine ebene Trennfläche .....      | 98  |
| 5.2.1 Reflexions- und Durchlassfaktoren .....                 | 99  |
| 5.2.2 Stehende Wellen.....                                    | 102 |
| 5.2.3 Leistungstransport .....                                | 105 |
| 5.2.4 Strahlungsdruck.....                                    | 106 |
| 5.3 Schiefer Einfall auf eine ebene Trennfläche .....         | 107 |
| 5.3.1 Brechungsgesetz und Fermatsches Prinzip.....            | 107 |
| 5.3.2 Fresnelsche Formeln .....                               | 113 |
| 5.4 Aufgaben .....                                            | 120 |
| <b>6 Reflexion und Brechung II (Anwendungen)</b> .....        | 121 |
| 6.1 Totaltransmission .....                                   | 121 |
| 6.1.1 Verschwinden der Reflexion bei schiefem Einfall .....   | 121 |
| 6.1.2 Brewster-Effekt .....                                   | 122 |
| 6.2 Reflexion am Erdboden .....                               | 129 |
| 6.3 Grundlagen der Totalreflexion .....                       | 134 |
| 6.3.1 Kritischer Winkel .....                                 | 134 |
| 6.3.2 Komplexer Brechungswinkel .....                         | 136 |
| 6.3.3 Inhomogene Grenzschichtwelle .....                      | 138 |
| 6.3.4 Totaltransmission und Totalreflexion .....              | 140 |
| 6.3.5 Technische Anwendungen.....                             | 140 |
| 6.4 Reflektierte Welle bei Totalreflexion .....               | 143 |
| 6.5 Transmittierte Welle bei Totalreflexion .....             | 148 |
| 6.5.1 Durchlassfaktoren.....                                  | 148 |
| 6.5.2 Berechnungsbeispiel.....                                | 150 |
| 6.5.3 Verhinderte Totalreflexion.....                         | 151 |
| 6.6 Goos-Hänchen-Effekt.....                                  | 154 |
| 6.7 Ebenes Drei- und Mehrschichtenproblem .....               | 159 |
| 6.7.1 Ebenes Dreischichtenproblem.....                        | 159 |
| 6.7.2 Schirmwirkung metallischer Wände.....                   | 160 |
| 6.7.3 Verlustloser Viertelwellen-Transformator.....           | 161 |
| 6.7.4 Verlustloser Halbwellen-Transformator.....              | 161 |
| 6.7.5 Transmissionskoeffizient beim Dreischichtenproblem..... | 162 |
| 6.7.6 Durchgangsdämpfung von Fensterglas.....                 | 164 |
| 6.8 Beugung an einer metallischen Schirmkante .....           | 167 |
| 6.9 Aufgaben .....                                            | 169 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>7 TEM-Wellen auf Leitungen</b>                                 | 170 |
| 7.1 Leitungsbeläge von TEM-Leitungen                              | 170 |
| 7.1.1 Innere Induktivität und Wandstromverluste                   | 171 |
| 7.1.2 Äußere Induktivität, Kapazität und Verluste im Dielektrikum | 174 |
| 7.2 Spannungs- und Stromwellen auf TEM-Leitungen                  | 177 |
| 7.2.1 Leitungsgleichungen                                         | 177 |
| 7.2.2 Reflexionsfaktor, Welligkeit und Leitungsimpedanz           | 179 |
| 7.2.3 Transformationsverhalten von Leitungen                      | 184 |
| 7.3 Doppelleitung                                                 | 190 |
| 7.3.1 Modellbildung                                               | 190 |
| 7.3.2 Statischer Ableitungsbelag                                  | 191 |
| 7.3.3 Dynamischer Ableitungsbelag                                 | 192 |
| 7.3.4 Dämpfungskonstante                                          | 194 |
| 7.3.5 Phasenkonstante                                             | 197 |
| 7.3.6 Leitungswellenimpedanz                                      | 200 |
| 7.4 Koaxialleitung                                                | 201 |
| 7.5 Einschwingverhalten von TEM-Leitungen                         | 204 |
| 7.6 Aufgaben                                                      | 209 |
| <b>8 Wellenleiter</b>                                             | 210 |
| 8.1 Schwingungsformen in Hohlleitern                              | 211 |
| 8.2 Rechteckhohlleiter                                            | 216 |
| 8.2.1 Eigenwellen                                                 | 216 |
| 8.2.2 Grenzfrequenzen und Cutoff                                  | 220 |
| 8.2.3 Wellengeschwindigkeiten                                     | 226 |
| 8.2.4 Feldkomponenten und Leistungstransport                      | 227 |
| 8.2.5 Materialmessungen in Hohlleitern                            | 232 |
| 8.2.6 Hohlleiterschaltungen und Orthogonalentwicklung             | 234 |
| 8.3 Rundhohlleiter                                                | 238 |
| 8.3.1 Eigenwellen                                                 | 239 |
| 8.3.2 Feldbilder                                                  | 244 |
| 8.4 Höhere Wellentypen der Koaxialleitung                         | 245 |
| 8.5 Besondere Hohlleitertypen                                     | 248 |
| 8.6 Hohlraumresonatoren                                           | 251 |
| 8.7 Anregung von Hohlleiterwellen                                 | 252 |
| 8.7.1 Modellbildung                                               | 252 |
| 8.7.2 Lösung der Helmholtz-Gleichung                              | 253 |
| 8.7.3 Koaxiale Stifteinkopplung                                   | 255 |
| 8.8 Aufgaben                                                      | 258 |
| <b>9 Dispersion in Hohlleitern</b>                                | 259 |
| 9.1 Impulse mit einer kosinusförmigen Einhüllenden                | 259 |
| 9.2 Impulse mit einer gaußförmigen Einhüllenden                   | 261 |
| 9.2.1 Gaußimpuls im Zeit- und Frequenzbereich                     | 261 |
| 9.2.2 Signal am Ausgang des Hohlleiters                           | 263 |
| 9.2.3 Optimale Impulsdauer                                        | 267 |
| 9.2.4 Augendiagramm                                               | 268 |

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.2.5 Maximal zulässige Bitrate .....                               | 270        |
| 9.3 Impulse mit einer rechteckigen Einhüllenden .....               | 275        |
| 9.3.1 Rechteckiger Einzelimpuls .....                               | 275        |
| 9.3.2 Folge aus Rechteckimpulsen .....                              | 278        |
| 9.3.3 Zusammenhang zwischen Impulsverzerrungen und Bandbreite ..... | 279        |
| 9.3.4 Impulsfolge mit Bandbegrenzung .....                          | 281        |
| 9.4 Aufgaben .....                                                  | 284        |
| <b>10 Grundbegriffe der Antennentechnik .....</b>                   | <b>285</b> |
| 10.1 Isotroper Strahler .....                                       | 285        |
| 10.2 Hertzscher Dipol als elektrischer Elementarstrahler .....      | 285        |
| 10.3 Kenngrößen von Antennen .....                                  | 287        |
| 10.3.1 Richtdiagramm .....                                          | 287        |
| 10.3.2 Richtfaktor und Gewinn .....                                 | 292        |
| 10.3.3 Äquivalenter Raumwinkel .....                                | 294        |
| 10.3.4 Antennenwirkfläche .....                                     | 296        |
| 10.3.5 Polarisation .....                                           | 300        |
| 10.4 Leistungsbilanz einer ungestörten Funkstrecke .....            | 302        |
| 10.5 Aufgaben .....                                                 | 305        |
| <b>11 Relativistische Elektrodynamik I (Grundlagen) .....</b>       | <b>306</b> |
| 11.1 Relativitätsprinzip .....                                      | 306        |
| 11.2 Lorentz-Transformation .....                                   | 307        |
| 11.2.1 Transformation der Raumzeit .....                            | 307        |
| 11.2.2 Additionstheorem der Geschwindigkeiten .....                 | 309        |
| 11.2.3 Transformation der Feldkomponenten .....                     | 313        |
| 11.3 Feld einer gleichförmig bewegten Ladung .....                  | 316        |
| 11.4 Aufgaben .....                                                 | 319        |
| <b>12 Relativistische Elektrodynamik II (Strahlung) .....</b>       | <b>320</b> |
| 12.1 Strahlung beschleunigter Ladungen .....                        | 320        |
| 12.1.1 Grundgleichungen .....                                       | 320        |
| 12.1.2 Strahlungsleistung .....                                     | 322        |
| 12.2 Linear beschleunigte Punktladung .....                         | 323        |
| 12.2.1 Strahlungsleistung .....                                     | 323        |
| 12.2.2 Richtcharakteristik .....                                    | 325        |
| 12.3 Kreisförmig beschleunigte Punktladung .....                    | 326        |
| 12.3.1 Strahlungsleistung .....                                     | 326        |
| 12.3.2 Richtcharakteristik .....                                    | 327        |
| 12.3.3 Teilchenbeschleuniger LEP, LHC und FCC .....                 | 329        |
| 12.3.4 Spektrum der Synchrotronstrahlung .....                      | 332        |
| 12.3.5 Plasmakühlung durch Synchrotronstrahlung .....               | 335        |
| 12.4 Aufgaben .....                                                 | 336        |
| <b>13 Relativistische Elektrodynamik III (Radartechnik) .....</b>   | <b>337</b> |
| 13.1 Radarreflexion an bewegten Objekten .....                      | 337        |
| 13.1.1 Gleichförmig bewegter ebener Metallspiegel .....             | 337        |

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.1.2 Doppler-Effekt in der Akustik.....                            | 339        |
| 13.1.3 Doppler-Effekt in der Elektrodynamik.....                     | 340        |
| 13.1.4 Doppler-Effekt und Aberration in der Radartechnik.....        | 345        |
| 13.2 Radargleichung und Leistungsreichweite .....                    | 350        |
| 13.3 Radarquerschnitt.....                                           | 354        |
| 13.4 Aufgaben .....                                                  | 359        |
| <b>14 Grundbegriffe von Strahlungsfeldern .....</b>                  | <b>360</b> |
| 14.1 Grundgleichungen .....                                          | 360        |
| 14.2 Potenziellösung der Feldgleichungen .....                       | 362        |
| 14.2.1 Magnetisches Vektorpotenzial .....                            | 363        |
| 14.2.2 Elektrisches Vektorpotenzial .....                            | 369        |
| 14.2.3 Darstellung der Feldstärken .....                             | 370        |
| 14.3 Fernfeldnäherungen.....                                         | 373        |
| 14.3.1 Fresnel-Näherung.....                                         | 375        |
| 14.3.2 Fraunhofer-Näherung.....                                      | 376        |
| 14.3.3 Fernfeldabstand und Antennengewinn .....                      | 379        |
| 14.3.4 Fernfelder und Fourier-Transformation .....                   | 381        |
| 14.4 Ausstrahlungsbedingung.....                                     | 384        |
| 14.5 Kantenbedingung.....                                            | 385        |
| 14.6 Huygenssches Prinzip.....                                       | 387        |
| 14.6.1 Vektorielle Formulierung.....                                 | 387        |
| 14.6.2 Skalare Formulierung.....                                     | 390        |
| 14.7 Kopolarisation und Kreuzpolarisation.....                       | 396        |
| 14.8 Aufgaben .....                                                  | 399        |
| <b>15 Elementardipole und Rahmenantennen.....</b>                    | <b>400</b> |
| 15.1 Elektrischer Elementarstrahler .....                            | 400        |
| 15.1.1 Strahlungsfelder .....                                        | 401        |
| 15.1.2 Wellengeschwindigkeiten und Nahfeldablösung.....              | 408        |
| 15.2 Magnetischer Elementarstrahler .....                            | 413        |
| 15.3 Kreisförmige Rahmenantenne beliebigen Umfangs .....             | 414        |
| 15.3.1 Vektorpotenzial eines kreisförmigen Ringstroms.....           | 415        |
| 15.3.2 Kreisförmige Rahmenantenne mit Umfang $U = n \lambda_0$ ..... | 419        |
| 15.3.3 Erweiterung auf beliebigen Umfang.....                        | 420        |
| 15.4 Aufgaben .....                                                  | 426        |
| <b>16 Lineare Antennen .....</b>                                     | <b>427</b> |
| 16.1 Zylinderantenne.....                                            | 428        |
| 16.2 Dünne Linearantenne.....                                        | 429        |
| 16.2.1 Strahlungsfelder .....                                        | 429        |
| 16.2.2 Wanderwellenantenne (Langdrahtantenne).....                   | 438        |
| 16.2.3 Strahlungswiderstand .....                                    | 441        |
| 16.2.4 Verkürzungsfaktor.....                                        | 448        |
| 16.2.5 Richtfaktor und Gewinn .....                                  | 452        |
| 16.3 Aufgaben .....                                                  | 455        |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>17 Gruppenantennen I (Grundlagen)</b>                          | 456 |
| 17.1 Gruppenfaktor bei räumlicher Anordnung                       | 458 |
| 17.2 Lineare Gruppen                                              | 459 |
| 17.2.1 Gruppencharakteristik                                      | 459 |
| 17.2.2 Querstrahler                                               | 464 |
| 17.2.3 Längsstrahler                                              | 466 |
| 17.2.4 Speisung längsstrahlender Gruppen                          | 469 |
| 17.2.5 Richtfaktor linearer Gruppen                               | 471 |
| 17.2.6 Nullwertbreite linearer Gruppen                            | 474 |
| 17.3 Kreuzdipol                                                   | 475 |
| 17.4 Yagi-Uda-Antenne                                             | 476 |
| 17.5 Aufgaben                                                     | 477 |
| <b>18 Gruppenantennen II (Anwendungen)</b>                        | 478 |
| 18.1 Phasengesteuerte Gruppenantennen                             | 478 |
| 18.2 Inhomogene Amplitudenbelegung                                | 483 |
| 18.3 Gruppenantennen mit Dolph-Tschebyscheff-Belegung             | 488 |
| 18.3.1 Allgemeine Grundlagen                                      | 488 |
| 18.3.2 Anzahl der Teilstrahler                                    | 490 |
| 18.3.3 Optimaler Elementabstand und Halbwertsbreite               | 491 |
| 18.3.4 Amplitudenverteilung der Speiseströme                      | 493 |
| 18.3.5 Berechnungsbeispiel                                        | 496 |
| 18.3.6 Richtfaktor bei querstrahlenden Gruppen                    | 498 |
| 18.3.7 Richtfaktor und Strombelegung                              | 501 |
| 18.3.8 Richtfaktor bei längsstrahlenden Gruppen                   | 502 |
| 18.3.9 Form der Hauptkeule                                        | 504 |
| 18.4 Verdünnte Gruppen                                            | 505 |
| 18.5 Ebene Gruppen                                                | 507 |
| 18.6 Antennen über Erde                                           | 508 |
| 18.7 Strahlungskopplung in ebenen Dipolgruppen                    | 515 |
| 18.8 Aufgaben                                                     | 517 |
| <b>19 Gruppenantennen III (Yagi-Uda-Antennen)</b>                 | 518 |
| 19.1 Zusammenfassung                                              | 518 |
| 19.2 Grundlegende Eigenschaften                                   | 519 |
| 19.3 Der Aufbau von Yagi-Uda-Antennen                             | 520 |
| 19.3.1 Die Erregerzone                                            | 520 |
| 19.3.2 Homogene Wellenleitersysteme                               | 521 |
| 19.3.3 Inhomogene Wellenleitersysteme                             | 523 |
| 19.4 Gruppen aus Yagi-Uda-Antennen                                | 525 |
| 19.5 Optimierung von Yagi-Uda-Antennen                            | 526 |
| 19.5.1 Zielfunktionen und erste Teilergebnisse                    | 527 |
| 19.5.2 Zum analytischen Entwurf von Yagi-Uda-Antennen             | 529 |
| 19.6 Die RFD20-Standard-Lang-Yagi-Antenne                         | 531 |
| 19.6.1 Reduktion der Parameter durch Einführung von Restriktionen | 531 |
| 19.6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse                             | 535 |
| 19.7 Gewinn und Bandbreite von RFDn-Yagi-Uda-Antennen             | 538 |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 19.7.1 Realisierter Gewinn.....                                       | 538        |
| 19.7.2 Die 1-dB-Bandbreite des realisierten Gewinns .....             | 539        |
| 19.8 Synthese von von RFDn-Yagi-Uda-Antennen.....                     | 542        |
| 19.9 Numerische Ergebnisse .....                                      | 547        |
| 19.10 Einfluss des Antennenträgers .....                              | 554        |
| 19.11 Aufgaben .....                                                  | 555        |
| <b>20 Breitbandantennen .....</b>                                     | <b>556</b> |
| 20.1 Doppelkonusantenne .....                                         | 556        |
| 20.1.1 Unendlich lange symmetrische Doppelkonusleitung.....           | 557        |
| 20.1.2 Symmetrische Doppelkonusantenne endlicher Länge .....          | 558        |
| 20.1.3 Näherungslösung bei kleinem Reflexionsfaktor .....             | 565        |
| 20.1.4 Doppelkonusantenne mit optimiertem Gewinn .....                | 569        |
| 20.2 Logarithmisch-periodische Antenne .....                          | 571        |
| 20.3 Spiral- und Fraktalantennen.....                                 | 574        |
| 20.4 Aufgaben .....                                                   | 577        |
| <b>21 Aperturstrahler I (Hohlleiterantennen) .....</b>                | <b>578</b> |
| 21.1 Prinzipien der Aperturstrahler .....                             | 578        |
| 21.2 Ebene Apertur im freien Raum (Chu-Modell).....                   | 580        |
| 21.3 Ebene Apertur im unendlichen ebenen Schirm (E-Feld-Modell) ..... | 587        |
| 21.3.1 Hohlleiterstrahler .....                                       | 588        |
| 21.3.2 Richtfaktor und Flächenwirkungsgrad .....                      | 593        |
| 21.4 Aufgaben .....                                                   | 595        |
| <b>22 Aperturstrahler II (Hornantennen) .....</b>                     | <b>596</b> |
| 22.1 Bauformen.....                                                   | 596        |
| 22.2 Sektorhorn .....                                                 | 596        |
| 22.3 Gültigkeitsgrenzen der quadratischen Näherung .....              | 600        |
| 22.4 Pyramidenhorn .....                                              | 601        |
| 22.4.1 Direktivität und Flächenwirkungsgrad .....                     | 601        |
| 22.4.2 Aperturabmessungen.....                                        | 605        |
| 22.4.3 Breite der Hauptkeule .....                                    | 605        |
| 22.4.4 Berechnungsbeispiele.....                                      | 607        |
| 22.5 Kegelhorn und Rillenhorn .....                                   | 609        |
| 22.5.1 Phasenfehler in der ebenen Hornapertur .....                   | 610        |
| 22.5.2 Aperturbelegung im Kegelhorn.....                              | 610        |
| 22.5.3 Wandimpedanz-Modell des Rillenhorns .....                      | 610        |
| 22.5.4 Aperturbelegung im Rillenhorn.....                             | 612        |
| 22.5.5 Integration der Aperturfelder des Rillenhorns.....             | 612        |
| 22.5.6 Keulenbreiten des Rillenhorns .....                            | 614        |
| 22.5.7 Direktivität von Rillenhorn und Kegelhorn.....                 | 616        |
| 22.5.8 Optimale Bauweise .....                                        | 618        |
| 22.6 Skalarhorn .....                                                 | 620        |
| 22.7 Aufgaben .....                                                   | 625        |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>23 Aperturstrahler III (Linsenantennen)</b>                   | 626 |
| 23.1 Konvexe Verzögerungslinse                                   | 626 |
| 23.2 Aperturlinse im optimalen Kegelhorn                         | 629 |
| 23.2.1 Einfluss des Linsenmaterials                              | 630 |
| 23.2.2 Berechnungsbeispiel                                       | 632 |
| 23.3 Konkave Beschleunigungslinse                                | 633 |
| 23.4 Luneburg-Linse                                              | 635 |
| 23.5 Aufgaben                                                    | 636 |
| <b>24 Aperturstrahler IV (Reflektorantennen)</b>                 | 637 |
| 24.1 Bauformen                                                   | 637 |
| 24.2 Rotationsparaboloid mit direkter Speisung                   | 637 |
| 24.3 Mehrspiegelantennen                                         | 641 |
| 24.4 Entwurf einer Cassegrain-Antenne                            | 642 |
| 24.5 Gewinnverlust durch Aperturabschattung                      | 646 |
| 24.6 Gewinnverlust durch Fehler der Oberflächenkontur            | 647 |
| 24.7 Gewinnverlust durch inhomogene Amplitudenbelegung           | 651 |
| 24.8 Aufgaben                                                    | 654 |
| <b>25 Schwarzer Strahler</b>                                     | 655 |
| 25.1 Schwarzkörperstrahlung und das Plancksche Strahlungsgesetz  | 655 |
| 25.2 Das Wiensche Verschiebungsgesetz                            | 659 |
| 25.3 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz                                 | 660 |
| 25.4 Die spektrale Verteilung der Planckschen Strahlungsfunktion | 661 |
| 25.4.1 Darstellung mit normiertem Argument                       | 661 |
| 25.4.2 Quantile der Planckschen Strahlungsfunktion               | 662 |
| 25.4.3 Universelle Strahlungskurven                              | 663 |
| 25.5 Radiometrische und photometrische Größen                    | 664 |
| 25.6 Beleuchtungsstärke                                          | 670 |
| 25.7 Die Solarkonstante                                          | 672 |
| 25.8 Anwendungen in der Photovoltaik                             | 673 |
| 25.9 Aufgaben                                                    | 674 |
| <b>26 Thermisches Rauschen</b>                                   | 675 |
| 26.1 Grundlagen                                                  | 675 |
| 26.2 Rauschleistungsdichte                                       | 676 |
| 26.2.1 Nyquist-Formel                                            | 676 |
| 26.2.2 Weißes und farbiges Rauschen                              | 677 |
| 26.3 Zweipolrauschen                                             | 680 |
| 26.3.1 Widerstandsrauschen                                       | 680 |
| 26.3.2 Netzwerke aus Ohmschen Widerständen                       | 681 |
| 26.3.3 Rauschen komplexer Impedanzen (Filterschaltungen)         | 684 |
| 26.4 Antennenrauschen                                            | 688 |
| 26.5 Aufgaben                                                    | 697 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>27 Streifenleitungsantennen</b>                                       | 698 |
| 27.1 Grundlegende Entwurfsrichtlinien                                    | 698 |
| 27.1.1 Bauformen und Einspeisung                                         | 698 |
| 27.1.2 Mikrostreifenleitungen und rechteckige Patch-Elemente             | 699 |
| 27.2 Parasitäre Oberflächenwellen auf einlagigen Substraten              | 704 |
| 27.2.1 Eigenwertgleichungen und Grenzfrequenzen                          | 704 |
| 27.2.2 Synchrone Verkopplung                                             | 708 |
| 27.2.3 Feldbilder                                                        | 709 |
| 27.3 Parasitäre Oberflächenwellen auf zweilagigen Substraten             | 710 |
| 27.4 Leistungsbetrachtungen                                              | 711 |
| 27.4.1 Leistung der Raumwelle                                            | 711 |
| 27.4.2 Leistung der $TM_0$ -Oberflächenwelle                             | 713 |
| 27.4.3 Strahlungswirkungsgrad                                            | 714 |
| 27.5 Bandbreite                                                          | 715 |
| 27.6 Analyse mit Hilfe des Cavity-Modells                                | 717 |
| 27.6.1 Patch mit abgeschnittenem Substrat (Fall ①)                       | 717 |
| 27.6.2 Grundplatte und Substrat mit unendlicher Ausdehnung (Fälle ②+③)   | 720 |
| 27.6.3 Kopolare und kreuzpolare Abstrahlung in den Fällen ① und ③        | 721 |
| 27.6.4 Weitere numerische Ergebnisse                                     | 723 |
| 27.6.5 Strahlungsleistung, Strahlungsleitwerte und Richtfaktor im Fall ② | 724 |
| 27.7 Gruppenantennen in Streifenleitungstechnik                          | 726 |
| 27.8 Aufgaben                                                            | 728 |
| <b>28 Spezielle Antennenformen</b>                                       | 729 |
| 28.1 Schlitzantenne                                                      | 729 |
| 28.2 Wendel- oder Helixantenne                                           | 733 |
| 28.3 Dielektrische Oberflächenwellenantenne                              | 737 |
| 28.4 Aufgaben                                                            | 740 |
| <b>Anhang</b>                                                            | 741 |
| A Mathematische Formeln                                                  | 741 |
| A.1 Konstanten                                                           | 741 |
| A.2 Trigonometrische Beziehungen                                         | 741 |
| A.3 Funktionen mit komplexem Argument                                    | 741 |
| A.4 Reihenentwicklungen für kleine Argumente                             | 742 |
| A.5 Asymptotische Darstellungen für große Argumente                      | 742 |
| A.6 Zylinderfunktionen und sphärische Zylinderfunktionen                 | 743 |
| A.7 Modifizierte Besselfunktionen 1. Art mit ganzzahligem Index          | 744 |
| A.8 Modifizierte Besselfunktionen 2. Art mit reellem Index               | 745 |
| A.9 Legendre-Polynome und ihre Ableitungen                               | 745 |
| A.10 Lommelsche Funktionen mit einem Index und 2 Argumenten              | 746 |
| A.11 Nützliche Integrale und Entwicklungen                               | 747 |
| A.12 Krummlinige orthogonale Koordinatensysteme                          | 748 |
| B Elektrotechnische Formeln                                              | 749 |
| B.1 Abkürzungen                                                          | 749 |
| B.2 Grundgleichungen                                                     | 749 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| B.3 Vektorpotenziale .....                                              | 749 |
| B.4 Feldgrößen.....                                                     | 749 |
| B.5 Verschiedenes.....                                                  | 749 |
| C Formeln zum Antennendesign.....                                       | 750 |
| C.1 Schlanke Dipolantennen im Freiraum mit Mittelpunktspeisung .....    | 750 |
| C.2 Gruppencharakteristik linearer Antennengruppen .....                | 750 |
| C.3 Strahlung einer linearen Belegung bzw. einer Rechteckapertur .....  | 751 |
| C.4 Strahlung einer Kreisapertur .....                                  | 751 |
| C.5 Ausbreitungskonstanten von Hohlleiterwellen .....                   | 751 |
| C.6 Hornstrahler mit Maximalgewinn bei fester Baulänge .....            | 752 |
| C.7 Beam efficiency und pattern factor elektrisch großer Antennen.....  | 752 |
| C.8 Näherung für den Hauptkeulenverlauf verschiedener Antennen.....     | 753 |
| C.9 Gruppenantennen mit Dolph-Tschebyscheff-Belegung .....              | 754 |
| D Eigenschaften ausgewählter Materialien.....                           | 755 |
| D.1 Relative Permittivität und Verlustfaktor (bei 300 K und 3 GHz)..... | 755 |
| D.2 Elektrische Leitfähigkeit von Metallen (bei 300 K) .....            | 755 |
| E Streuparameter .....                                                  | 756 |
| E.1 Streumatrix .....                                                   | 756 |
| E.2 Reflexion, Transmission und Welligkeit.....                         | 757 |
| F Integral-Transformationen.....                                        | 758 |
| F.1 Laplace-Transformation .....                                        | 758 |
| F.2 Fourier-Transformation.....                                         | 759 |
| G Aberration und Doppler-Effekt.....                                    | 760 |
| H Rauschen in Zweitorschaltungen .....                                  | 761 |
| I Antennenanlagen der Flugsicherung .....                               | 762 |
| Englische Übersetzungen wichtiger Fachbegriffe.....                     | 773 |
| Literaturverzeichnis .....                                              | 775 |
| Sachwortverzeichnis .....                                               | 792 |
| Personenverzeichnis.....                                                | 804 |