

# Inhaltsverzeichnis

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>                             | <b>1</b>  |
| 1.1 Frequenzbereiche                            | 1         |
| 1.2 Elektromagnetische Grundgrößen              | 2         |
| 1.3 Antennen und Strahlungsfelder im Überblick  | 4         |
| <b>2 Mathematische Grundlagen</b>               | <b>8</b>  |
| 2.1 Vektoralgebra                               | 8         |
| 2.1.1 Skalarprodukt                             | 9         |
| 2.1.2 Vektorprodukt                             | 10        |
| 2.1.3 Spatprodukt                               | 11        |
| 2.2 Vektoranalysis                              | 13        |
| 2.2.1 Differenziation von skalaren Feldern      | 13        |
| 2.2.2 Differenziation von Vektorfeldern         | 16        |
| 2.2.3 Rechnen mit dem Nabla-Operator            | 20        |
| 2.2.4 Integralsätze der Vektoranalysis          | 23        |
| 2.2.5 Helmholtzsches Theorem                    | 27        |
| 2.3 Koordinatensysteme                          | 28        |
| 2.4 Übungen                                     | 30        |
| <b>3 Grundlagen der Elektrodynamik</b>          | <b>31</b> |
| 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 Maxwellsche 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 Relativitätsprinzip                         | 51        |
| 3.7.1 Lorentz-Transformation                    | 52        |
| 3.7.2 Feld einer gleichförmig bewegten Ladung   | 57        |
| 3.8 Strahlung beschleunigter Elektronen         | 59        |
| 3.8.1 Strahlungsleistung                        | 61        |
| 3.8.2 Linear beschleunigte Punktladung          | 62        |
| 3.8.3 Kreisförmig beschleunigte Punktladung     | 63        |
| 3.9 Übungen                                     | 64        |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>4 Ebene Wellen</b>                                             | 65  |
| 4.1 Ebene Wellen im Dielektrikum                                  | 65  |
| 4.1.1 Lösung der Helmholtz-Gleichung                              | 65  |
| 4.1.2 Geschwindigkeitsdefinitionen                                | 69  |
| 4.2 Ebene Wellen im Leiter                                        | 74  |
| 4.2.1 Skineffekt                                                  | 74  |
| 4.2.2 EMV-Abschirmbleche                                          | 76  |
| 4.2.3 Verlustlose Bandleitung                                     | 77  |
| 4.2.4 Bandleitung mit Verlusten                                   | 78  |
| 4.2.5 Wandimpedanz-Modell                                         | 81  |
| 4.2.6 Kreiszylindrischer Draht                                    | 85  |
| 4.3 Ebene Wellen im Supraleiter                                   | 95  |
| 4.3.1 Londonsche Gleichungen                                      | 96  |
| 4.3.2 Telegraf- und Helmholtz-Gleichung                           | 97  |
| 4.4 Leistungstransport                                            | 101 |
| 4.5 Übungen                                                       | 103 |
| <b>5 Ausbreitungseffekte</b>                                      | 104 |
| 5.1 Polarisierung                                                 | 104 |
| 5.2 Senkrechter Einfall auf eine ebene Trennfläche                | 108 |
| 5.2.1 Reflexions- und Durchlassfaktoren                           | 109 |
| 5.2.2 Stehende Wellen                                             | 112 |
| 5.2.3 Leistungstransport                                          | 115 |
| 5.2.4 Strahlungsdruck                                             | 116 |
| 5.3 Radarreflexion an bewegten Objekten                           | 117 |
| 5.3.1 Gleichförmig bewegter ebener Metallsiegel                   | 117 |
| 5.3.2 Doppler-Effekt und Aberration                               | 119 |
| 5.4 Schiefer Einfall auf eine ebene Trennfläche                   | 122 |
| 5.4.1 Brechungsgesetz                                             | 122 |
| 5.4.2 Fresnelsche Formeln                                         | 126 |
| 5.4.3 Totaltransmission                                           | 130 |
| 5.4.4 Totalreflexion                                              | 136 |
| 5.5 Ebenes Drei- und Mehrschichtenproblem                         | 139 |
| 5.5.1 Ebenes Dreischichtenproblem                                 | 139 |
| 5.5.2 Schirmwirkung metallischer Wände                            | 140 |
| 5.5.3 Verlustloser Viertelwellen-Transformator                    | 141 |
| 5.5.4 Verlustloser Halbwellen-Transformator                       | 141 |
| 5.5.5 Durchgangsdämpfung von Fensterglas                          | 142 |
| 5.6 Beugung an einer metallischen Schirmkante                     | 145 |
| 5.7 Übungen                                                       | 147 |
| <b>6 TEM-Wellen auf Leitungen</b>                                 | 148 |
| 6.1 Leitungsbeläge von TEM-Leitungen                              | 148 |
| 6.1.1 Innere Induktivität und Wandstromverluste                   | 149 |
| 6.1.2 Äußere Induktivität, Kapazität und Verluste im Dielektrikum | 152 |
| 6.2 Spannungs- und Stromwellen auf TEM-Leitungen                  | 155 |
| 6.2.1 Leitungsgleichungen                                         | 155 |

|                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2.2 Reflexionsfaktor, Welligkeit und Leitungsimpedanz ..... | 157        |
| 6.2.3 Transformationsverhalten von Leitungen .....            | 162        |
| 6.3 Koaxialleitung .....                                      | 168        |
| 6.4 Einschwingverhalten von TEM-Leitungen .....               | 171        |
| 6.5 Übungen .....                                             | 176        |
| <b>7 Wellenleiter .....</b>                                   | <b>177</b> |
| 7.1 Schwingungsformen in Hohlleitern .....                    | 178        |
| 7.2 Rechteckhohlleiter .....                                  | 182        |
| 7.2.1 Eigenwellen .....                                       | 182        |
| 7.2.2 Hohlleiterschaltungen und Orthogonalentwicklung .....   | 191        |
| 7.3 Rundhohlleiter .....                                      | 196        |
| 7.3.1 Eigenwellen .....                                       | 196        |
| 7.3.2 Feldbilder .....                                        | 201        |
| 7.4 Höhere Wellentypen der Koaxialleitung .....               | 202        |
| 7.5 Besondere Hohlleitertypen .....                           | 205        |
| 7.6 Hohlraumresonatoren .....                                 | 208        |
| 7.7 Anregung von Hohlleiterwellen .....                       | 209        |
| 7.7.1 Modellbildung .....                                     | 209        |
| 7.7.2 Lösung der Helmholtz-Gleichung .....                    | 210        |
| 7.7.3 Koaxiale Stifteinkopplung .....                         | 212        |
| 7.8 Übungen .....                                             | 215        |
| <b>8 Grundbegriffe der Antennentechnik .....</b>              | <b>216</b> |
| 8.1 Isotroper Strahler .....                                  | 216        |
| 8.2 Hertzscher Dipol als elektrischer Elementarstrahler ..... | 216        |
| 8.3 Kenngrößen von Antennen .....                             | 218        |
| 8.3.1 Richtdiagramm .....                                     | 218        |
| 8.3.2 Richtfaktor und Gewinn .....                            | 223        |
| 8.3.3 Äquivalenter Raumwinkel .....                           | 225        |
| 8.3.4 Antennenwirkfläche .....                                | 227        |
| 8.3.5 Polarisierung .....                                     | 231        |
| 8.4 Leistungsbilanz einer ungestörten Funkstrecke .....       | 233        |
| 8.5 Übungen .....                                             | 236        |
| <b>9 Grundbegriffe von Strahlungsfeldern .....</b>            | <b>237</b> |
| 9.1 Grundgleichungen .....                                    | 237        |
| 9.2 Potenziallösung der Feldgleichungen .....                 | 239        |
| 9.2.1 Magnetisches Vektorpotenzial .....                      | 240        |
| 9.2.2 Elektrisches Vektorpotenzial .....                      | 246        |
| 9.2.3 Darstellung der Feldstärken .....                       | 247        |
| 9.3 Fernfeldnäherungen .....                                  | 250        |
| 9.3.1 Fresnel-Näherung .....                                  | 252        |
| 9.3.2 Fraunhofer-Näherung .....                               | 253        |
| 9.3.3 Fernfeldabstand und Antennengewinn .....                | 256        |
| 9.3.4 Fernfelder und Fourier-Transformation .....             | 258        |
| 9.4 Ausstrahlungsbedingung .....                              | 261        |

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.5 Kantenbedingung .....                                            | 262        |
| 9.6 Huygenssches Prinzip .....                                       | 264        |
| 9.6.1 Vektorielle Formulierung .....                                 | 264        |
| 9.6.2 Skalare Formulierung .....                                     | 267        |
| 9.7 Kopolarisation und Kreuzpolarisation .....                       | 273        |
| 9.8 Übungen .....                                                    | 276        |
| <b>10 Elementardipole und Rahmenantennen .....</b>                   | <b>277</b> |
| 10.1 Elektrischer Elementarstrahler .....                            | 277        |
| 10.1.1 Strahlungsfelder .....                                        | 278        |
| 10.1.2 Wellengeschwindigkeiten und Nahfeldablösung .....             | 285        |
| 10.2 Magnetischer Elementarstrahler .....                            | 289        |
| 10.3 Kreisförmige Rahmenantenne beliebigen Umfangs .....             | 291        |
| 10.3.1 Vektorpotenzial eines kreisförmigen Ringstroms .....          | 292        |
| 10.3.2 Kreisförmige Rahmenantenne mit Umfang $U = n \lambda_0$ ..... | 295        |
| 10.3.3 Erweiterung auf beliebigen Umfang .....                       | 297        |
| 10.4 Übungen .....                                                   | 303        |
| <b>11 Lineare Antennen .....</b>                                     | <b>304</b> |
| 11.1 Zylinderantenne .....                                           | 305        |
| 11.2 Dünne Linearantenne .....                                       | 306        |
| 11.2.1 Strahlungsfelder .....                                        | 306        |
| 11.2.2 Wanderwellenantenne (Langdrahtantenne) .....                  | 315        |
| 11.2.3 Strahlungswiderstand .....                                    | 318        |
| 11.2.4 Verkürzungsfaktor .....                                       | 325        |
| 11.2.5 Richtfaktor und Gewinn .....                                  | 328        |
| 11.3 Übungen .....                                                   | 331        |
| <b>12 Gruppenantennen .....</b>                                      | <b>332</b> |
| 12.1 Gruppenfaktor bei räumlicher Anordnung .....                    | 334        |
| 12.2 Lineare Gruppen .....                                           | 335        |
| 12.2.1 Gruppencharakteristik .....                                   | 335        |
| 12.2.2 Querstrahler .....                                            | 340        |
| 12.2.3 Längsstrahler .....                                           | 342        |
| 12.2.4 Richtfaktor linearer Gruppen .....                            | 346        |
| 12.2.5 Kreuzdipol .....                                              | 349        |
| 12.2.6 Yagi-Uda-Antenne .....                                        | 350        |
| 12.2.7 Phasengesteuerte Gruppenantennen .....                        | 352        |
| 12.2.8 Inhomogene Amplitudenbelegung .....                           | 354        |
| 12.2.9 Verdünnte Gruppen .....                                       | 358        |
| 12.3 Ebene Gruppen .....                                             | 361        |
| 12.4 Antennen über Erde .....                                        | 362        |
| 12.5 Strahlungskopplung in ebenen Dipolgruppen .....                 | 369        |
| 12.6 Übungen .....                                                   | 371        |
| <b>13 Breitbandantennen .....</b>                                    | <b>372</b> |
| 13.1 Doppelkonusantenne .....                                        | 372        |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.1.1 Unendlich lange symmetrische Doppelkonusleitung.....           | 373        |
| 13.1.2 Symmetrische Doppelkonusantenne endlicher Länge .....          | 374        |
| 13.1.3 Näherungslösung bei kleinem Reflexionsfaktor .....             | 381        |
| 13.1.4 Doppelkonusantenne mit optimiertem Gewinn .....                | 386        |
| 13.2 Logarithmisch-periodische Antenne.....                           | 387        |
| 13.3 Spiral- und Fraktalantennen.....                                 | 391        |
| 13.4 Übungen .....                                                    | 393        |
| <b>14 Aperturstrahler I (Hohlleiterantennen).....</b>                 | <b>394</b> |
| 14.1 Prinzipien der Aperturstrahler .....                             | 394        |
| 14.2 Ebene Apertur im freien Raum (Chu-Modell).....                   | 396        |
| 14.3 Ebene Apertur im unendlichen ebenen Schirm (E-Feld-Modell) ..... | 403        |
| 14.3.1 Hohlleiterstrahler .....                                       | 404        |
| 14.3.2 Richtfaktor und Flächenwirkungsgrad .....                      | 409        |
| 14.4 Übungen .....                                                    | 411        |
| <b>15 Aperturstrahler II (Hornantennen) .....</b>                     | <b>412</b> |
| 15.1 Bauformen .....                                                  | 412        |
| 15.2 Sektorhorn .....                                                 | 412        |
| 15.3 Gültigkeitsgrenzen der quadratischen Näherung .....              | 416        |
| 15.4 Pyramidenhorn .....                                              | 417        |
| 15.4.1 Direktivität und Flächenwirkungsgrad .....                     | 417        |
| 15.4.2 Aperturabmessungen .....                                       | 421        |
| 15.4.3 Breite der Hauptkeule .....                                    | 421        |
| 15.4.4 Berechnungsbeispiele.....                                      | 423        |
| 15.5 Kegelhorn und Rillenhorn .....                                   | 425        |
| 15.5.1 Phasenfehler in der ebenen Hornapertur .....                   | 425        |
| 15.5.2 Aperturbelegung im Kegelhorn.....                              | 426        |
| 15.5.3 Wandimpedanz-Modell des Rillenhorns .....                      | 426        |
| 15.5.4 Aperturbelegung im Rillenhorn.....                             | 428        |
| 15.5.5 Integration der Aperturfelder des Rillenhorns.....             | 428        |
| 15.5.6 Keulenbreiten des Rillenhorns .....                            | 430        |
| 15.5.7 Direktivität von Rillenhorn und Kegelhorn.....                 | 433        |
| 15.5.8 Optimale Bauweise .....                                        | 434        |
| 15.6 Skalarhorn .....                                                 | 436        |
| 15.7 Übungen .....                                                    | 441        |
| <b>16 Aperturstrahler III (Linsenantennen).....</b>                   | <b>442</b> |
| 16.1 Konvexe Verzögerungslinse.....                                   | 442        |
| 16.2 Aperturlinse im optimalen Kegelhorn .....                        | 445        |
| 16.2.1 Einfluss des Linsenmaterials .....                             | 446        |
| 16.2.2 Berechnungsbeispiel .....                                      | 448        |
| 16.3 Konkave Beschleunigungslinse .....                               | 450        |
| 16.4 Luneburg-Linse .....                                             | 451        |
| 16.5 Übungen .....                                                    | 452        |
| <b>17 Aperturstrahler IV (Reflektorantennen).....</b>                 | <b>453</b> |

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 17.1 Bauformen .....                                                           | 453        |
| 17.2 Rotationsparaboloid mit direkter Speisung .....                           | 456        |
| 17.3 Mehrspiegelantennen .....                                                 | 457        |
| 17.4 Entwurf einer Cassegrain-Antenne .....                                    | 458        |
| 17.5 Gewinnverlust durch Aperturabschattung .....                              | 462        |
| 17.6 Gewinnverlust durch Fehler der Oberflächenkontur .....                    | 463        |
| 17.7 Gewinnverlust durch inhomogene Amplitudenbelegung .....                   | 467        |
| 17.8 Übungen .....                                                             | 470        |
| <b>18 Aperturstrahler V (Schwarzer Strahler) .....</b>                         | <b>471</b> |
| 18.1 Schwarzkörperstrahlung und das Plancksche Strahlungsgesetz .....          | 471        |
| 18.2 Das Wiensche Verschiebungsgesetz .....                                    | 475        |
| 18.3 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz .....                                         | 476        |
| 18.4 Die spektrale Verteilung der Planckschen Strahlungsfunktion .....         | 477        |
| 18.4.1 Darstellung mit normiertem Argument .....                               | 477        |
| 18.4.2 Quantile der Planckschen Strahlungsfunktion .....                       | 478        |
| 18.4.3 Universelle Strahlungskurven .....                                      | 479        |
| 18.5 Radiometrische und photometrische Größen .....                            | 481        |
| 18.6 Die Solarkonstante .....                                                  | 486        |
| 18.7 Anwendungen in der Photovoltaik .....                                     | 487        |
| 18.8 Übungen .....                                                             | 488        |
| <b>19 Streifenleitungsantennen .....</b>                                       | <b>489</b> |
| 19.1 Grundlegende Entwurfsrichtlinien .....                                    | 489        |
| 19.1.1 Bauformen und Einspeisung .....                                         | 489        |
| 19.1.2 Mikrostreifenleitungen und rechteckige Patch-Elemente .....             | 490        |
| 19.2 Parasitäre Oberflächenwellen auf einlagigen Substraten .....              | 495        |
| 19.2.1 Eigenwertgleichungen und Grenzfrequenzen .....                          | 495        |
| 19.2.2 Synchrone Verkopplung .....                                             | 499        |
| 19.2.3 Feldbilder .....                                                        | 500        |
| 19.3 Parasitäre Oberflächenwellen auf zweilagigen Substraten .....             | 501        |
| 19.4 Leistungsbetrachtungen .....                                              | 502        |
| 19.4.1 Leistung der Raumwelle .....                                            | 502        |
| 19.4.2 Leistung der $TM_0$ -Oberflächenwelle .....                             | 504        |
| 19.4.3 Strahlungswirkungsgrad .....                                            | 505        |
| 19.5 Bandbreite .....                                                          | 506        |
| 19.6 Analyse mit Hilfe des Cavity-Modells .....                                | 508        |
| 19.6.1 Patch mit abgeschnittenem Substrat (Fall ①) .....                       | 508        |
| 19.6.2 Grundplatte und Substrat mit unendlicher Ausdehnung (Fälle ②+③) .....   | 511        |
| 19.6.3 Kopolare und kreuzpolare Abstrahlung in den Fällen ① und ③ .....        | 512        |
| 19.6.4 Weitere numerische Ergebnisse .....                                     | 514        |
| 19.6.5 Strahlungsleistung, Strahlungsleitwerte und Richtfaktor im Fall ② ..... | 515        |
| 19.7 Gruppenantennen in Streifenleitungstechnik .....                          | 517        |
| 19.8 Übungen .....                                                             | 519        |
| <b>20 Spezielle Antennenformen .....</b>                                       | <b>520</b> |
| 20.1 Schlitzantenne .....                                                      | 520        |

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 20.2 Wendel- oder Helixantenne .....                                    | 524        |
| 20.3 Dielektrische Oberflächenwellenantenne .....                       | 528        |
| 20.4 Übungen .....                                                      | 531        |
| <b>Anhang</b> .....                                                     | <b>532</b> |
| A Mathematische Formeln .....                                           | 532        |
| A.1 Konstanten.....                                                     | 532        |
| A.2 Trigonometrische Beziehungen.....                                   | 532        |
| A.3 Funktionen mit komplexem Argument.....                              | 532        |
| A.4 Reihenentwicklungen für kleine Argumente .....                      | 533        |
| A.5 Asymptotische Darstellungen für große Argumente.....                | 533        |
| A.6 Zylinderfunktionen und sphärische Zylinderfunktionen.....           | 534        |
| A.7 Legendre-Polynome und ihre Ableitungen.....                         | 534        |
| A.8 Nützliche Integrale .....                                           | 535        |
| A.9 Lommelsche Funktionen mit einem Index und zwei Argumenten.....      | 536        |
| A.10 Modifizierte Besselfunktionen .....                                | 537        |
| A.11 Krummlinige orthogonale Koordinatensysteme .....                   | 538        |
| B Elektrotechnische Formeln .....                                       | 539        |
| B.1 Abkürzungen .....                                                   | 539        |
| B.2 Grundgleichungen .....                                              | 539        |
| B.3 Vektorpotenziale .....                                              | 539        |
| B.4 Feldgrößen.....                                                     | 539        |
| B.5 Verschiedenes.....                                                  | 539        |
| C Formeln zum Antennendesign .....                                      | 540        |
| C.1 Schlanke Dipolantennen im Freiraum mit Mittelpunktspeisung.....     | 540        |
| C.2 Gruppencharakteristik linearer Antennengruppen .....                | 540        |
| C.3 Strahlung einer linearen Belegung bzw. einer Rechteckapertur .....  | 541        |
| C.4 Strahlung einer Kreisapertur .....                                  | 541        |
| C.5 Ausbreitungskonstanten von Hohlleiterwellen .....                   | 541        |
| C.6 Hornstrahler mit Maximalgewinn bei fester Baulänge .....            | 542        |
| C.7 Beam efficiency und pattern factor elektrisch großer Antennen.....  | 542        |
| C.8 Näherung für den Hauptkeulenverlauf verschiedener Antennen .....    | 543        |
| D Eigenschaften ausgewählter Materialien .....                          | 544        |
| D.1 Relative Permittivität und Verlustfaktor (bei 300 K und 3 GHz)..... | 544        |
| D.2 Elektrische Leitfähigkeit von Metallen (bei 300 K) .....            | 544        |
| E Streuparameter .....                                                  | 545        |
| E.1 Streumatrix .....                                                   | 545        |
| E.2 Reflexion, Transmission und Welligkeit.....                         | 546        |
| F Ausgewählte Laplace-Korrespondenzen .....                             | 547        |
| Englische Übersetzungen wichtiger Fachbegriffe.....                     | 548        |
| Literaturverzeichnis .....                                              | 551        |
| Sachwortverzeichnis .....                                               | 563        |
| Personenverzeichnis .....                                               | 572        |