

# Inhalt

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung .....</b>                                              | <b>15</b> |
| 1.1      | Hochfrequenzanwendungen .....                                        | 15        |
| 1.2      | Frequenzbereiche .....                                               | 18        |
| 1.3      | Hochfrequenztechnische Erscheinungen.....                            | 19        |
| 1.3.1    | Elektrisch kurze Leitungen .....                                     | 20        |
| 1.3.2    | Leitungen mit einer Länge in der Größenordnung der Wellenlänge ..... | 22        |
| 1.3.3    | Antennen und Abstrahlung elektromagnetischer Wellen .....            | 22        |
| 1.4      | Ausblick auf die folgenden Kapitel .....                             | 23        |
| <b>2</b> | <b>Elektromagnetische Felder und Wellen.....</b>                     | <b>25</b> |
| 2.1      | Physikalische und mathematische Grundlagen.....                      | 25        |
| 2.1.1    | Elektrostatische Feldgrößen.....                                     | 25        |
| 2.1.1.1  | Elektrische Feldstärke und Spannung.....                             | 25        |
| 2.1.1.2  | Polarisation und relative Dielektrizitätszahl .....                  | 29        |
| 2.1.1.3  | Verhalten bei Wechselstrom .....                                     | 30        |
| 2.1.1.4  | Dielektrische Verschiebungsdichte .....                              | 31        |
| 2.1.1.5  | Elektrische Feldenergie und Kapazität .....                          | 31        |
| 2.1.2    | Stationäre elektrische Strömungsfelder und magnetische Felder .....  | 32        |
| 2.1.2.1  | Stromdichte, Leistungsdichte und Widerstand .....                    | 32        |
| 2.1.2.2  | Magnetische Feldstärke und magnetisches Vektorpotential.....         | 34        |
| 2.1.2.3  | Magnetische Feldenergie und Induktivität .....                       | 36        |
| 2.1.2.4  | Lorentz-Kraft .....                                                  | 36        |
| 2.1.3    | Vektoranalytische Operatoren .....                                   | 37        |
| 2.1.3.1  | Divergenz .....                                                      | 37        |
| 2.1.3.2  | Rotation .....                                                       | 37        |
| 2.2      | Maxwell'sche Gleichungen .....                                       | 38        |
| 2.2.1    | Differentialform für allgemeine Zeitabhängigkeit .....               | 38        |
| 2.2.2    | Differentialform für harmonische Zeitabhängigkeit.....               | 39        |
| 2.2.3    | Integralform .....                                                   | 40        |
| 2.2.4    | Materialgleichungen .....                                            | 42        |
| 2.2.5    | Verhalten an Materialgrenzen .....                                   | 44        |

|         |                                                     |    |
|---------|-----------------------------------------------------|----|
| 2.3     | Einteilung elektromagnetischer Feldprobleme .....   | 46 |
| 2.3.1   | Statische Felder .....                              | 46 |
| 2.3.2   | Quasistatische Felder .....                         | 46 |
| 2.3.3   | Schnell veränderliche Felder .....                  | 47 |
| 2.4     | Skineffekt .....                                    | 47 |
| 2.5     | Elektromagnetische Wellen .....                     | 50 |
| 2.5.1   | Wellengleichung und ebene Wellen .....              | 50 |
| 2.5.2   | Polarisation .....                                  | 54 |
| 2.5.2.1 | Lineare Polarisation .....                          | 55 |
| 2.5.2.2 | Zirkulare Polarisation .....                        | 55 |
| 2.5.2.3 | Elliptische Polarisation .....                      | 55 |
| 2.5.3   | Reflexion und Brechung an ebenen Grenzflächen ..... | 56 |
| 2.5.3.1 | Senkrechter Einfall .....                           | 57 |
| 2.5.3.2 | Schräger Einfall .....                              | 59 |
| 2.5.4   | Kugelwellen .....                                   | 64 |
| 2.6     | Zusammenfassung .....                               | 65 |
| 2.7     | Übungsaufgaben .....                                | 66 |

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>Leitungstheorie und Signale auf Leitungen .....</b>           | <b>68</b> |
| 3.1      | Leitungstheorie .....                                            | 68        |
| 3.1.1    | Ersatzschaltbild eines kurzen Leitungsstücks .....               | 68        |
| 3.1.2    | Telegraphengleichung .....                                       | 70        |
| 3.1.3    | Spannungs- und Stromwellen auf Leitungen .....                   | 72        |
| 3.1.4    | Einseitig abgeschlossene Leitung .....                           | 75        |
| 3.1.5    | Eingangsimpedanz einer abgeschlossenen Leitung .....             | 77        |
| 3.1.6    | Verlustlose Leitungen .....                                      | 79        |
| 3.1.7    | Leitungen mit geringen Verlusten .....                           | 81        |
| 3.1.8    | Verschiedene Leitungsabschlüsse einer verlustlosen Leitung ..... | 82        |
| 3.1.8.1  | Angepasste Leitung .....                                         | 83        |
| 3.1.8.2  | Kurzgeschlossene Leitung .....                                   | 84        |
| 3.1.8.3  | Leerlaufende Leitung .....                                       | 86        |
| 3.1.8.4  | Allgemeiner Abschluss .....                                      | 88        |
| 3.1.9    | Verlustlose Leitungen als Impedanztransformatoren .....          | 89        |
| 3.1.9.1  | Der Viertelwellenlängentransformator .....                       | 89        |
| 3.1.9.2  | Der Halbwellenlängentransformator .....                          | 89        |
| 3.1.10   | Reflexionsfaktor einer verlustlosen Leitung .....                | 90        |
| 3.1.11   | Smith-Chart-Diagramm .....                                       | 93        |

|         |                                                                   |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2     | Zeitsignale auf Leitungen.....                                    | 98  |
| 3.2.1   | Sprungförmige Signale.....                                        | 98  |
| 3.2.1.1 | Angepasste Quelle und angepasster Abschluss .....                 | 98  |
| 3.2.1.2 | Angepasste Quelle und fehlangepasster (resistiver) Abschluss .... | 100 |
| 3.2.1.3 | Angepasste Quelle und fehlangepasster (reaktiver) Abschluss ....  | 102 |
| 3.2.1.4 | Fehlanpassung an Quelle und Last .....                            | 104 |
| 3.2.2   | Rechteckförmige Signale .....                                     | 107 |
| 3.3     | Augendiagramm .....                                               | 108 |
| 3.4     | Zusammenfassung .....                                             | 111 |
| 3.5     | Übungsaufgaben .....                                              | 112 |

## **4 Wellenleiter .....114**

|         |                                                         |     |
|---------|---------------------------------------------------------|-----|
| 4.1     | Überblick über technisch bedeutsame Leitungstypen.....  | 114 |
| 4.2     | Koaxialleitungen.....                                   | 117 |
| 4.2.1   | Induktivitätsbelag und Leitungswellenwiderstand .....   | 118 |
| 4.2.2   | Dämpfung bei schwachen Verlusten.....                   | 120 |
| 4.2.2.1 | Metallische Verluste .....                              | 120 |
| 4.2.2.2 | Dielektrische Verluste .....                            | 121 |
| 4.2.3   | Nutzbarer Frequenzbereich .....                         | 122 |
| 4.2.4   | Anwendungsgebiete.....                                  | 124 |
| 4.3     | Paralleldrahtleitung .....                              | 124 |
| 4.3.1   | Leitungswellenwiderstand .....                          | 124 |
| 4.3.2   | Anwendungsgebiete.....                                  | 125 |
| 4.4     | Mikrostreifenleitungen (Microstrip) .....               | 126 |
| 4.4.1   | Wellenwiderstand und effektive Permittivitätszahl ..... | 126 |
| 4.4.2   | Dispersion und nutzbarer Frequenzbereich .....          | 129 |
| 4.4.3   | Anwendungsgebiete.....                                  | 130 |
| 4.5     | Streifenleitung (Stripline) .....                       | 130 |
| 4.5.1   | Leitungswellenwiderstand .....                          | 131 |
| 4.5.2   | Nutzbarer Frequenzbereich .....                         | 131 |
| 4.5.3   | Anwendungsgebiete.....                                  | 132 |
| 4.6     | Rechteckhohlleiter .....                                | 132 |
| 4.6.1   | Allgemeine Überlegungen.....                            | 133 |
| 4.6.2   | Die Grundwelle .....                                    | 136 |
| 4.6.3   | Höhere Wellentypen .....                                | 140 |
| 4.6.4   | Einsatzgebiete von Hohlleitern .....                    | 142 |
| 4.6.5   | Anregung von Hohlleiterwellen .....                     | 142 |
| 4.6.6   | Hohlraumresonatoren .....                               | 143 |

|       |                                                            |     |
|-------|------------------------------------------------------------|-----|
| 4.7   | SIW-Leitungen (Substrate-integrated waveguide) .....       | 145 |
| 4.7.1 | Aufbau und Kenngrößen .....                                | 146 |
| 4.7.2 | Leitungsübergang Microstrip-SIW .....                      | 147 |
| 4.8   | Dreileitersysteme .....                                    | 150 |
| 4.8.1 | Gleich- und Gegentaktwellen .....                          | 150 |
| 4.8.2 | Leitungswellenwiderstände und Ausbreitungskonstanten ..... | 152 |
| 4.8.3 | Leistungsabschluss .....                                   | 155 |
| 4.9   | Übungsaufgaben .....                                       | 155 |

## **5 Streuparameter.....157**

|       |                                                                |     |
|-------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1   | Mehrtorgleichungen in Matrixform.....                          | 157 |
| 5.2   | Definition von Wellengrößen .....                              | 158 |
| 5.3   | Streuparameter und Leistung.....                               | 160 |
| 5.4   | Spezielle Eigenschaften von Schaltungen.....                   | 163 |
| 5.4.1 | Anpassung .....                                                | 163 |
| 5.4.2 | Leistungsanpassung.....                                        | 164 |
| 5.4.3 | Reziprozität (Übertragungssymmetrie) .....                     | 165 |
| 5.4.4 | Symmetrie .....                                                | 166 |
| 5.4.5 | Verlustlosigkeit bei Passivität .....                          | 166 |
| 5.4.6 | Rückwirkungsfreiheit .....                                     | 167 |
| 5.4.7 | Besondere Bedingungen bei Dreitoren .....                      | 167 |
| 5.5   | Berechnung von Streumatrizen .....                             | 167 |
| 5.5.1 | Reflexionsfaktoren.....                                        | 168 |
| 5.5.2 | Transmissionsfaktoren.....                                     | 168 |
| 5.5.3 | Umnormierung einer Streumatrix auf andere Torwiderstände ..... | 171 |
| 5.6   | Signalflussmethode .....                                       | 172 |
| 5.7   | Messung von Streuparametern .....                              | 178 |
| 5.8   | Übungsaufgaben .....                                           | 182 |

## **6 Hochfrequenzbauelemente und -schaltungen .....185**

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 6.1   | Konzentrierte Bauelemente .....    | 185 |
| 6.1.1 | Widerstände .....                  | 185 |
| 6.1.2 | Kondensatoren .....                | 187 |
| 6.1.3 | Spulen .....                       | 189 |
| 6.2   | Leitungsresonatoren .....          | 190 |
| 6.2.1 | Halbwellenlängenresonator.....     | 190 |
| 6.2.2 | Viertelwellenlängenresonator ..... | 192 |
| 6.3   | Anpassschaltungen.....             | 194 |

|         |                                                                       |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.1   | LC-Anpassnetzwerke .....                                              | 194 |
| 6.3.2   | Anpassung mit Leitungen .....                                         | 197 |
| 6.3.2.1 | Viertelwellenlängentransformator .....                                | 197 |
| 6.3.2.2 | Stichleitung und Butterfly-Stubs .....                                | 198 |
| 6.4     | Filter mit konzentrierten Bauelementen .....                          | 200 |
| 6.4.1   | Klassischer LC-Filterentwurf mit Induktivitäten und Kapazitäten ..... | 201 |
| 6.4.2   | Entwurf von Butterworth-Filtern .....                                 | 203 |
| 6.4.2.1 | Filter mit Tiefpassverhalten .....                                    | 203 |
| 6.4.2.2 | Filter mit Hochpassverhalten .....                                    | 206 |
| 6.4.2.3 | Filter mit Bandpassverhalten .....                                    | 207 |
| 6.5     | Leitungsfiler .....                                                   | 210 |
| 6.5.1   | Seitengekoppelte Filter (Edge-coupled-line-Filter) .....              | 211 |
| 6.5.2   | Seitengekoppelte Filter (Hairpin-Filter) .....                        | 215 |
| 6.5.3   | Stepped-impedance-Filter .....                                        | 216 |
| 6.5.4   | Metallisch geschirmte Filter (Gehäuseresonanzen) .....                | 217 |
| 6.5.5   | Hohlleiterfilter .....                                                | 218 |
| 6.6     | Zirkulatoren .....                                                    | 219 |
| 6.7     | Leistungsteiler .....                                                 | 221 |
| 6.7.1   | Wilkinson-Leistungsteiler .....                                       | 221 |
| 6.7.2   | Leistungsteiler mit ungleicher Leistungsaufteilung .....              | 222 |
| 6.8     | Branchline-Koppler .....                                              | 225 |
| 6.8.1   | Konventioneller 3dB-Koppler .....                                     | 225 |
| 6.8.2   | Ungleiche Leistungsaufteilung und Impedanztransformation .....        | 225 |
| 6.9     | Rat-race-Koppler .....                                                | 229 |
| 6.10    | Richtkoppler .....                                                    | 229 |
| 6.11    | Symmetrierglieder .....                                               | 233 |
| 6.12    | Elektronische Schaltungen .....                                       | 234 |
| 6.12.1  | Mischer .....                                                         | 236 |
| 6.12.2  | Verstärker und Oszillatoren .....                                     | 239 |
| 6.13    | Moderne HF-Entwurfswerkzeuge .....                                    | 240 |
| 6.13.1  | HF-Schaltungssimulatoren .....                                        | 240 |
| 6.13.2  | Elektromagnetische 3D-Feldsimulation .....                            | 241 |
| 6.14    | Übungsaufgaben .....                                                  | 244 |

## **7 Antennen .....246**

|       |                                     |     |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 7.1   | Grundbegriffe und Kenngrößen .....  | 246 |
| 7.1.1 | Antennen als Wellentypwandler ..... | 246 |
| 7.1.2 | Nahfeld und Fernfeld .....          | 247 |

|         |                                                       |     |
|---------|-------------------------------------------------------|-----|
| 7.1.3   | Isotroper Kugelstrahler .....                         | 248 |
| 7.1.4   | Kenngrößen für das Strahlungsfeld einer Antenne ..... | 249 |
| 7.1.5   | Anpassung und Bandbreite .....                        | 255 |
| 7.2     | Praktische Antennenbauformen .....                    | 256 |
| 7.3     | Mathematische Behandlung des Hertz'schen Dipols.....  | 259 |
| 7.4     | Drahtantennen .....                                   | 263 |
| 7.4.1   | Halbwellendipol .....                                 | 263 |
| 7.4.2   | Monopol .....                                         | 266 |
| 7.4.3   | Verkürzung von Monopolantennen.....                   | 267 |
| 7.5     | Schlitzantennen .....                                 | 268 |
| 7.6     | Aperturstrahler und Hornantennen .....                | 271 |
| 7.6.1   | Aperturstrahler.....                                  | 271 |
| 7.6.2   | Hornantennen .....                                    | 273 |
| 7.7     | Planare Antennen .....                                | 275 |
| 7.7.1   | Rechteckige Patch-Antenne .....                       | 276 |
| 7.7.1.1 | Abstrahlung eines Patch-Elementes.....                | 276 |
| 7.7.1.2 | Resonanzfrequenz und Patch-Abmessungen .....          | 277 |
| 7.7.1.3 | Speisung von Patch-Antennen .....                     | 278 |
| 7.7.2   | Patch-Antennen mit zirkularer Polarisisation .....    | 281 |
| 7.7.3   | Planare Dipol- und Inverted-F-Antennen.....           | 283 |
| 7.8     | Gruppenantennen.....                                  | 285 |
| 7.8.1   | Einzelcharakteristik und Gruppenfaktor .....          | 285 |
| 7.8.2   | Phasengesteuerte Antennen .....                       | 289 |
| 7.8.2.1 | Lineare Anordnung der Antennenelemente.....           | 289 |
| 7.8.2.2 | Flächige Anordnung der Antennenelemente .....         | 293 |
| 7.8.3   | Beamforming.....                                      | 295 |
| 7.9     | Weitere Antennenkonzepte .....                        | 300 |
| 7.10    | Übungsaufgaben .....                                  | 301 |

**8 Funkwellen .....302**

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 8.1   | Wellenausbreitungseffekte .....      | 302 |
| 8.1.1 | Reflexion und Brechung .....         | 302 |
| 8.1.2 | Absorption.....                      | 303 |
| 8.1.3 | Beugung.....                         | 304 |
| 8.1.4 | Streuung .....                       | 305 |
| 8.2   | Einfache Ausbreitungsszenarien ..... | 307 |
| 8.2.1 | Freiraumausbreitung.....             | 307 |
| 8.2.2 | Dämpfung von Wellen in Luft.....     | 309 |

|       |                                                            |     |
|-------|------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2.3 | Reflexion an Streuzielen (Radarrückstreuquerschnitt) ..... | 310 |
| 8.2.4 | Doppler-Effekt .....                                       | 319 |
| 8.2.5 | Ausbreitung über ebenem Grund (Zweiwegeausbreitung) .....  | 319 |
| 8.2.6 | Richtfunkstrecken .....                                    | 322 |
| 8.2.7 | Geschichtete Medien.....                                   | 324 |
| 8.3   | Komplexe Umgebungen .....                                  | 327 |
| 8.3.1 | Mehrwegeausbreitung .....                                  | 327 |
| 8.3.2 | Clutter-Factor-Modell .....                                | 329 |
| 8.3.3 | Okumura-Hata-Model .....                                   | 330 |
| 8.3.4 | Physikalische Modelle und numerische Feldberechnung .....  | 332 |
| 8.4   | Zusammenfassung .....                                      | 334 |
| 8.5   | Übungsaufgaben .....                                       | 335 |

|          |                                                         |            |
|----------|---------------------------------------------------------|------------|
| <b>A</b> | <b>Anhang .....</b>                                     | <b>337</b> |
| A.1      | Koordinatensysteme .....                                | 337        |
| A.1.1    | Kartesisches Koordinatensystem .....                    | 338        |
| A.1.2    | Zylinderkoordinatensystem .....                         | 339        |
| A.1.3    | Kugelkoordinatensystem .....                            | 340        |
| A.2      | Kenngößen von Schwingkreisen .....                      | 341        |
| A.2.1    | Serienschwingkreis .....                                | 341        |
| A.2.2    | Parallelschwingkreis .....                              | 346        |
| A.3      | Logarithmische Darstellung von technischen Größen ..... | 351        |
| A.3.1    | Dimensionslose Größen .....                             | 351        |
| A.3.2    | Relative und absolute Pegel .....                       | 352        |
| A.3.3    | Pegelplan einer Übertragungsstrecke.....                | 352        |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| <b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b> | <b>354</b> |
|--------------------------------------------|------------|

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>Literatur .....</b> | <b>359</b> |
|------------------------|------------|

|                    |            |
|--------------------|------------|
| <b>Index .....</b> | <b>364</b> |
|--------------------|------------|